

Sistema de Control y Monitoreo de Consumo Energético para Equipos de Climatización Orientado a Internet de las Cosas (IoT)

Ing. José David Ruiz Ariza



UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y
ELECTRÓNICA**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

ABRIL DE 2019

Sistema de Control y Monitoreo de Consumo Energético para Equipos de Climatización Orientado a Internet de las Cosas (IoT)

Ing. José David Ruiz Ariza

Trabajo de grado para obtener el título de:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA

Director: Ph.D (C). Jorge Iván Silva Ortega
Codirector: MSc. (C) Heyder David Páez Logreira

UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN Y
ELECTRÓNICA**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA

BARRANQUILLA, COLOMBIA

ABRIL DE 2019

Nota de aceptación:

Firma de jurado

Firma de jurado

Barranquilla, abril de 2019

Contenido

Lista de tablas y figuras	7
Introducción	16
El Problema	18
1. Planteamiento del Problema	18
2. Justificación	20
3. Objetivos	21
3.1. Objetivo General	21
3.2. Objetivos Específicos.....	22
Marco Teórico - Conceptual	22
4. Antecedentes	22
4.1. Monitoreo y control de sistemas HVAC.....	22
5. Referentes Teóricos	26
5.1. Sistemas de Climatización (HVAC)	26
5.2. Sistemas de Aire Acondicionado	28
5.3. Clasificación de los sistemas de aire acondicionado	30
5.4. Internet de las Cosas – IoT.....	39
5.5. Tarjeta de desarrollo NODEMCU v3	44
Materiales	48
6. Tarjeta de Desarrollo NodeMcu V3.0.....	48

7.	Sensores	49
7.1.	Sensor DHT21.....	50
7.2.	Sensor de corriente no invasivo ECS1030.....	51
7.3.	Módulos sensor emisor (KY-005) y receptor (KY-022).....	52
7.4.	Módulos sensor de Voltaje.....	53
	Metodología.....	54
8.	Tipo, enfoque y alcance de la investigación	54
9.	Diseño de la investigación	54
9.1.	Fase de Análisis (Fase 1)	55
9.2.	Fase de Diseño (Fase 2)	55
9.3.	Fase de Implementación (Fase 3).....	56
9.4.	Fase de Validación (Fase 4)	56
10.	Desarrollo del sistema de monitoreo y control	57
10.1.	Análisis de las variables para la caracterización del sistema y recinto. 57	
10.2.	Diseño y simulación del sistema de control de AC	58
10.3.	Implementación del sistema de control de AC en un recinto.	62
10.4.	Validación del sistema	65
	Análisis y Resultados.....	66
11.	Análisis de la literatura	66
12.	Diseño del sistema de control de AC.....	68

13. Implementación del Sistema	70
14. Validación del sistema	71
14.1. Monitoreo de temperatura interna	72
14.2. Potencia consumida	73
14.3. indicadores de temperatura y consumo instantáneo	73
14.4. Temperatura externa actual y potencia promedio de las últimas 24 horas 74	
14.5. Corriente instantánea	74
14.6. Análisis de los resultados con la implementación del sistema	
HVACControler	75
Conclusiones	78
Referencias	80

Lista de tablas y figuras

Tablas

Tabla 5.1 Comparativo entre los protocolos utilizados para IoT.....	44
Tabla 5.2. Comparación entre Arduino, Raspberry y NodeMcu.....	47
Tabla 6.3. Características de NodeMcu v3.....	49
Tabla 7.4. Características del sensor DHT21.....	51
Tabla 7.5. Características del sensor ECS1030.....	51
Tabla 10.6. Características del Equipo en estudio.....	58
Tabla 12.7. Correlaciones entre temperatura interna y temperatura externa.....	70
Tabla 14.8. Correlación de Pearson Luego de implementado el Sistema.....	76

Figuras

Figura 5.1. Circuito básico de refrigeración por compresión de vapor.	29
Figura 5.2. Taxonomía de las técnicas de Control.....	38
Figura 5.3. Diagrama de bloques del controlador PID.	39
Figura 5.4. Internet de las cosas.....	40
Figura 5.5. Población mundial respecto dispositivos conectados a internet.....	41
Figura 5.6. Arquitectura MQTT.	43
Figura 5.7. Modelo de publicación y suscripción de MQTT.....	43
Figura 5.8. Tarjeta NodeMCU v3.....	45
Figura 5.9. Arduino uno, leonardo y101.	45
Figura 5.10. Tarjeta Raspberry pi 3.	46
Figura 6.11. Tarjeta de desarrollo New NodeMcu v3.	49

Figura 7.12. Sensor Dht 21 aspecto externo e interno.	50
Figura 7.13. Sensor de corriente No invasivo ECS1030.	52
Figura 7.14. Modulo emisor infrarrojo.	52
Figura 7.15. Modulo receptor de infrarrojos KY-022.	53
Figura 7.16. Circuito para sensor de voltaje.	54
Figura 9.17. Flujograma de la solución.	57
Figura 10.18. Arquitectura para la captura de datos iniciales.	59
Figura 10.19. Diagrama de bloques y ecuación de transferencia del sistema.	59
Figura 10.20. Simulación de la técnica de control clásico Proporcional Integral. ...	60
Figura 10.21. Conexiones para decodificar los código IR.	60
Figura 10.22. Arquitectura del sistema usando el protocolo MQTT.	62
Figura 10.23. Montaje del Broker.	63
Figura 10.24. montaje del sensor ECS1030 en equipo de refrigeración.	63
Figura 10.25. Montaje de sensor de corriente, voltaje y temperatura.	64
Figura 10.26. Montaje de actuador.	64
Figura 10.27. Visualización de las variables monitoreadas.	65
Figura 11.28. Resultados del análisis de la literatura.	67
Figura 11.29. Resultados de la vigilancia tecnológica.	68
Figura 12.30. Grafica de la temperatura y el consumo del equipo en estudio.	69
Figura 13.31. Montaje del sistema completo.	70
Figura 13.32. Visualización de la plataforma.	71
Figura 14.33. Tablero inicial de la plataforma HVACcontroler.	72
Figura 14.34. Grafica de monitoreo de temperatura interna.	72
Figura 14.35. Monitoreo de la potencia consumida en KW.	73

Figura 14.36. Indicadores de potencia y temperatura.	74
Figura 14.37. Temperatura externa actual y potencia promedio.	74
Figura 14.38. Temperatura externa actual y potencia promedio.	75
Figura 14.39. Grafica de variables implementando el sistema de control.	75
Figura 14.40. Comparación de temperatura interna.	77
Figura 14.41. Comparación del consumo de potencia del sistema.	77

Dedicatoria

A mi hijo José David.

A mi esposa Vanesa

A mi madre

A mi padre

Agradecimientos

Agradezco:

A Dios por toda la fuerza y las bendiciones que me dio para realizar el presente trabajo de investigación.

A mi esposa y mi hijo por su amorosa comprensión en aquellos momentos difíciles.

A mi madre y mi padre por todo su apoyo incondicional y por toda su guía formación en valores.

A mis tutores por su amistad y todo su empeño en la asesoría del presente trabajo.

Resumen

Los sistemas de climatización, o HVAC por sus siglas en inglés (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*), consumen el 40% de la energía doméstica total, siendo para Colombia más del 25% de la demanda energética en hogares y oficinas. De acuerdo a lo estudiado en el estado del arte, son diversos los factores que influyen en la eficiencia de estos sistemas. Algunos de los factores que influyen en el comportamiento de los sistemas de climatización son: la eficiencia propia del sistema fabricado (características intrínsecas), las condiciones ambientales de cada región (condiciones extrínsecas, como la temperatura externa), el uso responsable por parte de los usuarios finales, y la percepción del confort por parte de los ocupantes del recinto donde opera el sistema, entre otras. En esta investigación se aborda la problemática del consumo energético de los sistemas HVAC, desde la visión del consumo racional basado en las condiciones de funcionamiento de los mismos. Lo anterior, implica analizar y correlacionar el comportamiento de los sistemas HVAC con los cambios en el comportamiento de las condiciones de la temperatura del medio ambiente (externa). Además, integrar soluciones de control y monitoreo a las tecnologías de internet de las Cosas (IoT) para gestionar información valiosa a partir del análisis de datos en tiempo real. Es así que, el presente documento resume el desarrollo de un sistema de control y monitoreo de consumo energético para un sistema de aire acondicionado (AC) orientado a IoT. Con la implementación de tecnologías basadas en *IoT* se logra un aporte significativo a las herramientas de monitoreo, adquisición de datos y por ende, de seguimiento para la evaluación de las técnicas de control de estos sistemas. La acción de monitoreo genera grandes cantidades de datos que pueden interesarle a los usuarios, investigadores o empresas distribuidoras y comercializadoras de sistemas de climatización. Dentro del documento se definen los requisitos y técnicas de control, para el

desarrollo de un dispositivo embebido usando una arquitectura basada en el protocolo MQTT aplicada al sistema de climatización. Al igual que se describen las etapas consideradas durante la implementación en un sistema HVAC tipo mini-split convencional. Finalmente, los resultados del sistema de control y monitoreo son comparados con los datos del mismo sistema sin el dispositivo embebido a fin de validar funcionamiento, implementación e integración con el sistema.

Palabras Clave: sistemas HVAC, control, monitoreo, IoT

Abstract

HVAC systems (Heating, Ventilating and Air Conditioning) consume 40% of total domestic energy, with more than 25% of energy demand in homes and offices in Colombia. According to what has been studied in the state of the art, there are various factors that influence the efficiency of these systems. Some of the factors that influence the behavior of air conditioning systems are: the efficiency inherent to the manufactured system (intrinsic characteristics), the environmental conditions of each region (extrinsic conditions, such as external temperature), the responsible use by the end users, and the perception of comfort on the part of the occupants of the enclosure where the system operates, among others. This research addresses the problem of energy consumption of HVAC systems, from the view of rational consumption based on their operating conditions. The above implies to analyze and correlate the behavior of HVAC systems with changes in the behavior of environmental (external) temperature conditions. In addition, integrate control and monitoring solutions to the Internet of Things (IoT) technologies to manage valuable information based on real-time data analysis. Thus, this document summarizes the development of a control system and monitoring of energy consumption for an air conditioning (AC) system oriented to IoT. With the implementation of IoT-based technologies, a significant contribution is made to the monitoring tools, data acquisition and therefore, monitoring for the evaluation of the control techniques of these systems. The monitoring action generates large amounts of data that may be of interest to users, researchers or distribution and marketing companies of air conditioning systems. The document defines the requirements and control techniques for the development of an embedded device using an architecture based on the MQTT protocol applied to the air conditioning system. As well as the stages considered during the implementation in a conventional mini-split HVAC system are described. Finally, the

results of the control and monitoring system are compared with the data of the same system without the embedded device in order to validate operation, implementation and integration with the system.

Keywords: HVAC systems, control, monitoring, IoT

Introducción

Para la Agencia Internacional de Energía (IEA: International Energy Agency, del inglés) es motivo de preocupación que, a través de los años y con el aumento de la población mundial, el consumo de energía crece desmesuradamente. Según la IEA, debido a lo mencionado anteriormente, el 40% del consumo de energía doméstico corre por cuenta de los sistemas de Aire Acondicionado (HVAC: Heating, Ventilation and Air Conditioning, del inglés).

Colombia no es ajena a las características de la demanda de energía a nivel mundial. Según el Informe Sectorial Sobre la Evolución de la Distribución y Comercialización de Energía Eléctrica, el 25% del consumo de energía de hogares y oficinas en Colombia se debe al uso de sistemas HVAC. En Barranquilla las condiciones climáticas obligan a la población a emplear los sistemas HVAC para climatizar los espacios de trabajo, estudio, ocio y otros. De tal forma que, el uso de estos sistemas es completamente necesario para otorgar confort a las personas en el desarrollo de sus actividades cotidianas.

Son muchas las causas de la baja eficiencia en los sistemas HVAC, según el Departamento de Energía de los Estados Unidos (U.S. Department of Energy), las causas más comunes son las pérdidas de refrigerante, mantenimientos inadecuados, fallas del sistema de control, problemas de sensado y problemas de drenaje. Sin embargo, según lo estudiado en la literatura actual sobre eficiencia en sistemas de HVAC, es posible destacar que las condiciones climatológicas adversas, como altas temperaturas ambientales (temperatura externa), afectan directamente la eficiencia de los sistemas HVAC.

Al observar las cifras de la demanda de energía y la importancia vital del uso de los sistemas HVAC, salta a la vista que mejorar la eficiencia de estos sistemas incurriría en un aporte significativo para el ahorro energético mundial, tal como lo propone la IEA (2016).

Son muchos los intentos a nivel mundial por aumentar la eficiencia de los sistemas HVAC, así se demuestra en el estado de la literatura con los estudios de Mirinejad, Welch, & Spicer (2012), Zhu, Yang, & Lu (2013), Yang & Wang (2015), entre otros. Estos estudios se caracterizan por partir del análisis de los sistemas HVAC a través de la implementación de sistemas de monitoreo, para luego aplicar técnicas de control avanzado, con las que se busca mejorar la eficiencia energética. Por consiguiente, la presente investigación toma como base las tendencias de la literatura actual para desarrollar sus objetivos.

Como un componente de valor agregado se integra el sistema de monitoreo y control a las tecnologías de Internet de las cosas (IoT: Internet of Things, del inglés). Con lo anterior es posible gestionar autónomamente los datos recabados a través del monitoreo, entregar esos datos a sistemas con altos niveles de procesamiento para ejecutar acciones de control avanzadas, y proporcionar a los usuarios información útil sobre el comportamiento de los sistemas HVAC.

Este documento presenta la siguiente estructura: **EL PROBLEMA:** en esta sección se realiza el planteamiento del problema en estudio, se presentan los objetivos y la justificación de la investigación. **MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL:** aquí se presentan algunos antecedentes y referentes teóricos consultados en la literatura actual que sustentan la importancia y sugieren un sendero para el desarrollo de la solución. **MATERIALES:** En esta sección se seleccionan y describen los referentes técnicos sobre los que se enmarca el desarrollo de la solución. **METODOLGÍA:** aquí se describen los métodos empleados en la construcción de la solución: la selección y revisión de la literatura y el diseño e implementación de la solución. **ANÁLISIS Y RESULTADOS:** aquí se presenta el análisis concienzudo de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología elegida.

CONCLUSIONES: en esta sección se presentan los principales hallazgos y conclusiones de obtenidos y la verificación del cumplimiento de los objetivos de la investigación.

El Problema

1. Planteamiento del Problema

Según la agencia internacional de la energía (AIE) el consumo energético a nivel mundial (desde 1971 a la actualidad) es directamente proporcional al tiempo. Esto se debe, en gran medida, al aumento de la población mundial, y la inclusión de tecnologías y aparatos eléctricos domésticos e industriales. Sin embargo, los sistemas de climatización, o HVAC por sus siglas en inglés (Heating, Ventilating and Air Conditioning), consumen el 40% de la energía domestica total (International Energy Agency, 2016).

En Colombia más del 25% de la demanda energética de los hogares y oficinas es consumida por los sistemas HVAC (UPME, 2010a). En la región caribe colombiana, más exactamente en el departamento del Atlántico, se encuentra la ciudad de Barranquilla, que posee una ubicación geográfica y condiciones climáticas que le permite estar dentro de un rango de temperatura promedio mínima de 25° y máxima de 35° (Cama-Pinto et al., 2016). Por estos rangos de temperatura los hogares, centros de educación, oficinas, industria y comercio, se ven obligados a utilizar sistemas de climatización que les garantice una temperatura entre 21° C y 26° C con una humedad relativa del 50%, relación que manifiesta (Villadiego & Velay-Dabat, 2014) para brindarle un estado de confort aceptable a las personas que ocupan estos espacios.

Los sistemas de climatización están causando un aumento en el consumo energético en los usuarios, esto se presenta por la ausencia de control en las variables eléctricas, falta de monitoreo en tiempo real y pocas decisiones autónomas o remotas por

parte de sistemas inteligentes (UPME, 2010b). Por otro lado, según (International Energy Agency, 2016) Existen 5 problemas asociados a los sistemas HVAC: pérdidas de refrigerante, mantenimientos inadecuados, fallas del sistema de control, problemas de censado y problemas de drenaje.

Dentro de las soluciones propuestas existen técnicas de monitoreo y control en tiempo real que permiten identificar el estado actual del equipo bajo las condiciones de operación. Dentro de estas se encuentran las tecnologías que funcionan aplicando Internet de las cosas (IoT), el cual se define como una red interconectada de objetos que se comunican entre sí y generan datos para otros sistemas (Atzori, Iera, & Morabito, 2010). El concepto de IoT está basado en dispositivos embebidos dotados de sensores, actuadores y módulos de procesamiento e interconectividad para la toma de decisiones sin intervención humana.

Siguiendo este orden de ideas, es necesaria la selección y validación de tecnologías adecuadas para el monitoreo y control de sistemas de climatización que garanticen una correcta gestión del consumo energético. Por tal motivo es indispensable una selección adecuada de los componentes que integran los sistemas de monitoreo y control.

Es en este punto donde IoT, junto con hardware embebido como Arduino, se perfilan como una solución de bajo costo en comparación con otras tecnologías, debido a que emplea sensores, actuadores de bajo costo y análisis del consumo energético (Amorim, Dias, & Soares, 2015).

Después de lo anteriormente expuesto, resulta oportuno aclarar que IoT y los sistemas embebidos también presentan características que se deben estudiar con más detalle, de acuerdo con la aplicación específica. Siendo el objetivo principal, Evaluar cuál técnica de control y plataforma de hardware es la apropiada para los requisitos específicos,

integración con diferentes protocolos a fin de seleccionar la mejor tecnología que se adecue a las necesidades específicas planteadas. Con base en la anterior afirmación, que radica de formular las especificaciones deseadas de un sistema de HVAC operando bajo los esquemas de control y monitoreo basados en IoT, se formula la siguiente pregunta problema: **¿Cómo se puede integrar los sistemas de monitoreo y control a las tecnologías de IoT para garantizar la optimización energética de los sistemas HVAC?**

2. Justificación

“OMNES HOMINES NATURA SCIRE DESIDERANT” Aristóteles, que traducido del latín al español significa todos los hombres desean por naturaleza saber (Naturaleza, 1993)

Y esto se debe a querer comprender el porqué de las cosas, para así poder controlarlo como dijo el físico matemático William Thomson Kelvin: “Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre.”(OBS, 2018)

El sistema de control y de monitoreo del consumo energético nace de la necesidad que se presenta en la región caribe Colombiana, por su localización posee un clima cálido, tropical y húmedo, haciendo que sea una de las regiones más calurosas de Colombia. Más precisamente en barranquilla, la cual es la ciudad donde se desarrolla el proyecto, donde las temperaturas van desde los 24°C hasta los 35°C (Weather Spark, 2018).

“Sin embargo el cuerpo humano posee una temperatura en la cual fisiológicamente se siente a gusto, la idea de implementar los quipos de climatización es poder aproximarse a estas condiciones de confort para satisfacer las necesidades”(Eyras, 2012).

Instalar servicios para la gestión de la climatización se debe realizar para que las personas se sientan en zonas de confort debido a que las temperaturas que afronta la Región Caribe Colombiana son elevadas. Sin embargo, de allí nace otro problema, al instalar equipos de climatización el consumo energético aumenta ocasionando un alto costo en las tarifas de servicios eléctricos. Por esta razón, se propone un sistema de control y monitoreo de consumo energético por medio del cual se puede tener datos en tiempo real. Este sistema se implementa con tecnología IoT que permite enlazar hardware programables para controlar y sensar las diferentes variables asociadas al consumo energético, contribuyendo a fomentar el uso responsable de la energía.

Con la implementación de tecnologías basadas en *IoT* se logra un aporte significativo en el incremento de la eficiencia, optimización y uso de los recursos, reduciendo costes y pérdidas, generando grandes cantidades de datos que pueden interesarle a los usuarios de estos sistemas, comunidad investigativa o empresas distribuidoras y comercializadoras de energía. El correcto análisis de todas estas variables proporcionará un mejor desempeño en el recinto donde se implementará el sistema.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Proponer un sistema de control y monitoreo de consumo energético para equipos de climatización en edificaciones tipo interior basado en Internet de las cosas (IoT).

3.2. Objetivos Específicos

- Definir los requisitos de las técnicas de control y arquitecturas de monitoreo aplicable a sistemas de climatización.
- Diseñar la arquitectura del sistema de control y monitoreo para equipos de climatización.
- Implementar la técnica de control seleccionada sobre un sistema de climatización de acuerdo a los requisitos de control y monitoreo establecidos.
- Validar el funcionamiento del sistema de monitoreo y control de equipos de climatización.

Marco Teórico - Conceptual

4. Antecedentes

4.1. Monitoreo y control de sistemas HVAC

A continuación se presenta un análisis de las principales investigación encontradas en la búsqueda de la literatura, haciendo énfasis en ejes temáticos; técnicas de control y monitoreo en sistemas de climatización (HVAC).

(Lin & Broberg, 2001) desarrollaron un sistema de control, monitoreo y programación de operaciones basado en Internet para los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). La arquitectura del sistema incluye características tales como control, medición, redes e informes. Abordaron problemas como: selección de arquitectura, electrónica, procesadores y software integrados y tecnologías de Internet. También realizaron una propuesta de una arquitectura de sistema HVAC basada en Internet que combina tecnología web, redes y funciones de control digital directo. El

sistema propuesto incluyó las tecnologías necesarias para admitir el control del termostato digital en tiempo real, la recopilación de datos, el acceso remoto y el control de ocupación, el control de detección de luz y las vistas del historial de utilización de HVAC. Este sistema permitió a los usuarios tomar decisiones de energía rentables e identificar rápidamente los puntos problemáticos de los sistemas HVAC para minimizar el tiempo de inactividad del sistema.

(Wang et al., 2013) identificaron que el rendimiento de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) pueden no satisfacer las expectativas de diseño debido a la instalación incorrecta del equipo, la degradación del equipo, las fallas de los sensores o las secuencias de control incorrectas. La puesta en servicio identifica e implementa medidas operativas y de mantenimiento rentables en los edificios para adecuarlos a la intención de diseño u operación óptima. Un edificio de oficinas existente se utiliza como un estudio de caso para demostrar el proceso de puesta en servicio. Las herramientas de evaluación comparativa de la energía del edificio se aplican para evaluar el rendimiento energético de las oportunidades de detección en todo el nivel del edificio. Los resultados de la evaluación comparativa del edificio indicaron un gran potencial de ahorro de gas natural. Las operaciones defectuosas en los sistemas HVAC, como las operaciones inadecuadas de los economizadores del lado del aire, el calentamiento y enfriamiento simultáneos y el inicio óptimo inefectivo, se identificaron mediante análisis de datos de tendencias y pruebas funcionales. El potencial de ahorro de energía para cada medida de puesta en servicio se cuantifica con un modelo de simulación de edificio calibrado. Se logró un ahorro de energía real del 10% después de la implementación de medidas rentables.

Afram & Janabi-Sharifi (2014) realizaron una revisión bibliográfica de los métodos de control, enfatizando en la teoría y las aplicaciones del control modelo predictivo (MPC)

para sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Varios métodos de control utilizados para el control de HVAC se identificaron a partir de la revisión de la literatura, y se presenta una breve encuesta de cada método. Compararon MPC con el de otros enfoques de control. Los factores que afectan el rendimiento del MPC (incluida la configuración de control, el tipo de proceso, el modelo, la técnica de optimización, el horizonte de predicción, el horizonte de control, las restricciones y la función de costo) se elaboran utilizando ejemplos específicos de la literatura. Se identificaron las brechas en la investigación de MPC.

Yang & Wang (2015) afirman que la principal tarea para lograr la automatización de edificios es implementar una estrategia de control eficaz en los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). El sistema de HVAC debe controlarse adecuadamente para proporcionar una temperatura relativamente constante y cómoda, así como aire fresco y filtrado con un rango de humedad cómodo para los edificios. En este trabajo, diseñaron una estructura de control jerárquico para controlar el sistema HVAC con alta eficiencia. Tanto el modelo de construcción como los modelos de equipos HVAC se desarrollan para estudiar el impacto de las operaciones del sistema HVAC en el ambiente interior. En el sistema de control propuesto, se integra un optimizador que utiliza inteligencia de enjambre para coordinar cada unidad en el sistema HVAC para reducir el consumo de energía. Se realizan estudios de comparación para estudiar el desempeño en tiempo real de la estrategia de control propuesta en un entorno de construcción.

Wu, Jia, & Guan (2016) formularon el problema de control HVAC multiroom como una optimización basada en eventos, donde las decisiones se toman solo cuando ocurren ciertos eventos. El tamaño del espacio de eventos es significativamente menor que el del espacio de estado. En segundo lugar, para simplificar aún más el proceso de cálculo,

desarrollaron un método de solución aproximado que se centra en políticas basadas en eventos locales. Estas políticas controlan los dispositivos terminales en una habitación utilizando únicamente la información de esa habitación. Tercero, demostraron que el rendimiento de este método a través de dos conjuntos de ejemplos numéricos. En el ejemplo a pequeña escala de dos habitaciones, se muestra que su método pudo lograr una solución casi óptima. En el ejemplo a gran escala, se muestra que el enfoque basado en eventos locales puede lograr una política que sea mejor que el método de control basado en umbrales, el método de control de histéresis y el método de control predictivo.

Rajith, Soki, & Hiroshi (2018) Los sistemas de ventilación y aire acondicionado de calefacción (HVAC) consumen una parte significativa de la energía dentro de los edificios corporativos, principalmente debido a la falta de un control estricto que puede comprometer la eficiencia energética o la comodidad del usuario. Por estas razones propusieron un sistema de control de HVAC simple y optimizado que automatiza la operación de HVAC en tiempo real para una compensación óptima de costo-confort utilizando técnicas de optimización y respuesta a la demanda. El sistema está construido sobre un marco IoT (Internet of Things), donde los parámetros térmicos de los sensores y los comentarios de los usuarios se recopilan para el procesamiento en tiempo real en su entorno de nube distribuida. Usaron un modelo predictivo que usa el pronóstico de series de tiempo basado en la Red Neural Artificial, el Perceptrón de Múltiples Capas (MLP) y optimizaron el problema de control de HVAC usando el problema de Programación Lineal de Enteros Mixtos (MILP). Los comentarios de los usuarios se obtienen periódicamente para establecer la temperatura deseada dinámicamente y también se utilizan para la evaluación subjetiva de la efectividad de HVAC. Este experimento indica que lograron una reducción

del 20% -40% en el consumo de energía (verano) aproximadamente y mantuvieron el confort térmico del usuario de manera constante.

5. Referentes Teóricos

5.1. Sistemas de Climatización (HVAC)

Un sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) es la tecnología que se usa en interiores de recintos para conservar un clima agradable. El objetivo es proporcionar confort térmico y calidad de aire aceptable. El diseño de un sistema HVAC se basa en los principios de la termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor. Los cuartos limpios (*clean rooms*) son áreas donde se minimizan la introducción, generación y retención de partículas en el interior del cuarto, y en el cual la temperatura, humedad, patrones de flujo de aire, movimiento del aire y presión son controlados (Pacheco et al., 2018), y según (Robert McDowall, 2006) consta de 7 procesos fundamentales.

1. Calentamiento: el proceso de agregar energía térmica (calor) a los condicionados espacio con el propósito de aumentar o mantener la temperatura del espacio.

2. Enfriamiento: el proceso de eliminación de la energía térmica (calor) de los condicionados espacio con el propósito de bajar o mantener la temperatura del espacio

3. Humidificación: el proceso de agregar vapor de agua (humedad) al aire en el espacio acondicionado con el propósito de aumentar o mantener la humedad contenido del aire.

4. Deshumidificación: el proceso de eliminación del vapor de agua (humedad) del aire en el espacio acondicionado con el propósito de bajar o mantener el contenido de humedad del aire.

5. Limpieza: el proceso de eliminación de partículas (polvo, otros.) y biológico contaminantes, (insectos, polen, otros.) del aire entregado a los espacio con el propósito de mejorar o mantener la calidad del aire.

6. Ventilación: el proceso de intercambio de aire entre el exterior y el espacio acondicionado a los efectos de diluir los contaminantes gaseosos en el aire y la mejora o el mantenimiento de la calidad del aire, la composición y la frescura.

La ventilación se puede lograr a través de ventilación natural o ventilación mecánica. La ventilación natural es impulsada por corrientes de aire naturales, la ventilación mecánica se puede lograr mediante el uso de ventiladores para aspirar aire desde el exterior o ventiladores que extraen el aire del espacio exterior del recinto.

7. Movimiento de aire: el proceso de circulación y mezcla de aire a través de acondicionado espacios en el edificio con el propósito de lograr la ventilación adecuada y facilitar la transferencia de energía térmica.

El campo de los sistemas de climatización (Heating, Ventilating, and Air Conditioning (HVAC)) es muy amplio, se pueden encontrar sistemas sencillos en el hogar para el enfriamiento, sistemas sofisticados para la industria, o especiales y de alta tecnología como por ejemplo las naves espaciales. Desde lo anterior, los contextos donde pueden ser aplicados trae consigo requisitos según la necesidad, como por ejemplo:

- Granjas inteligentes
- Quirófano de un hospital
- Cadena de frio de alimentos
- Conservación de las obras de arte en madera y fibra
- Aulas educativas, entre otros..

5.2. Sistemas de Aire Acondicionado

En los climas cálidos como es el caso de la ciudad de Barranquilla, se utilizan los sistemas de climatización orientado a el enfriamiento o ventilación, debido al clima y la ubicación geográfica de esta ciudad (Cama-Pinto et al., 2016).

Los sistemas de aire acondicionado según (Miranda, 2005d) tienen como objetivo general mantener ciertas condiciones climáticas en un recinto, entre las cuales podemos resaltar la temperatura, la humedad y la calidad del aire, con la finalidad de proporcionar una sensación de confort y bienestar a sus ocupantes. Los sistemas de aire acondicionado cuenta con una variable energética empleada en la mayoría de los proyectos que guardan relación con la temática; esta variable es conocida con el nombre de entalpia, la entalpia está definida como una forma de expresar la energía térmica de un fluido o un cuerpo cualquiera en un proceso de flujo. Esta variable tiene una correlación con el proceso de funcionamiento de este sistema a la hora de someter el aire local a unas operaciones de calentamiento, enfriamiento, humidificación o deshumidificación según sea el estado del aire atmosférico.

A juzgar por las condiciones climáticas del país al no poseer estaciones o periodos climáticos se afirma que las condiciones de temperatura y humedad son muy versátiles en cualquier punto del país. En relación a lo expuesto anteriormente, existen dos tipos de sistemas de aire acondicionado: Los de refrigeración y Los de calefacción.

El funcionamiento básico de los sistemas de aire acondicionado para refrigeración es apaciguar la temperatura en un recinto, de tal modo que, al absorber el calor del recinto se disminuye la temperatura del ambiente, creando una sensación agradable de enfriamiento a sus habitantes. Ahora bien; los sistemas de aire acondicionado para calefacción son inversamente proporcionales a los de refrigeración dado que su funcionalidad es

completamente opuesta; para este caso, la temperatura en vez de disminuir, aumenta, con la finalidad de crear un ambiente agradable en aquellos recintos que presentan condiciones de frío inherentes. (QUADRI, 2001d)

5.2.1. Ciclo De Refrigeración

El ciclo de refrigeración de un sistema de aire acondicionado es un circuito básico de refrigeración por compresión de vapor, el cual tiene como resultado la producción del frío. La máquina de compresión de vapor consta de un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador como lo muestra la Figura 1. Cabe resaltar que existen otros procedimientos para lograr la producción del frío, sin embargo, este es uno de los más empleados en el mercado. (Miranda, 2005a).

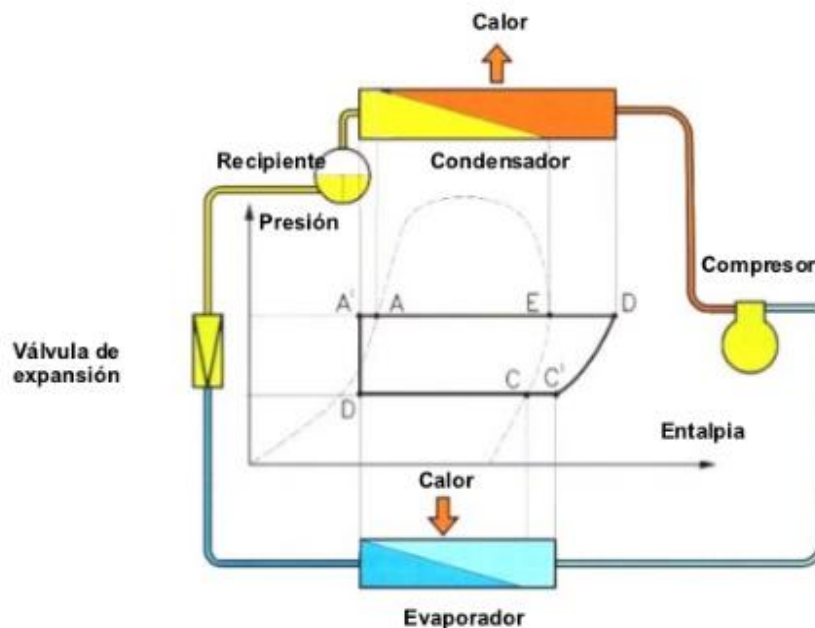


Figura 1. Circuito básico de refrigeración por compresión de vapor.

Fuente: Tomada de (ASHRAE, 2008).

Al abrirse la válvula de expansión, deja pasar la cantidad correcta de refrigerante al evaporador, esta llega en un estado casi líquido, es decir, el refrigerante se encuentra

compuesto por una base líquida de 75% y una base gaseosa de 25%; a medida que el refrigerante atraviesa el evaporador se produce una transferencia de energía térmica consiguiendo así un cambio de estado de casi líquido a completamente gaseoso. Luego, el refrigerante en estado gaseoso llega al compresor, el cual tiene como finalidad aumentar la presión del refrigerante gaseoso o vapor proveniente del evaporador para facilitarle la tarea al condensador, cuando el vapor llega al condensador se realiza un intercambio de calor, donde el calor obtenido en el evaporador y en el compresor se elimina del sistema de refrigeración, cabe resaltar que, en el condensador el calor del gas de descarga se cede al agua, aire o una combinación de ambas (ASHRAE, 2008) . Luego de que el refrigerante deja la etapa del condensador se dirige hacia la válvula de expansión para que circule nuevamente por el evaporador y se reinicie el ciclo de refrigeración.

5.3. Clasificación de los sistemas de aire acondicionado

En la actualidad, a la hora de realizar una clasificación de los sistemas de aire acondicionado se le da prioridad a cuatro criterios, conforme a los dos tipos existentes de sistemas de aires acondicionados(Miranda, 2005b). Cabe resaltar que, solo se tomaron en cuenta las clasificaciones referentes a los sistemas de aires acondicionados de refrigeración.

5.3.1. Clasificación según su misión

Según su misión o propósito se pueden considerar dos subtemas:

5.3.1.1. Confort

Posee como principal objetivo crear las mejores condiciones atmosféricas con la finalidad de obtener una buena salud, bienestar y un máximo rendimiento para con los habitantes de un recinto. En síntesis, estos sistemas son empleados en gran variedad en los

hogares, oficinas o en aquellos recintos en donde pueda haber una gran aglomeración de habitantes a cualquier hora del día, un ejemplo claro de ello, son los restaurantes, supermercados, salas de fiestas, instituciones educativas, entre otros. (QUADRI, 2001a)

5.3.1.2. Procesos industriales

A diferencia de la clasificación expuesta anteriormente, la clasificación para los procesos industriales no busca crear las condiciones apropiadas conforme a las necesidades humanas, sino que tiene como prioridad controlar las condiciones atmosféricas dentro del recinto para satisfacer los requerimientos climáticos en cuanto a maquinaria. (QUADRI, 2001a)

5.3.2. Clasificación según su forma de instalación

La particularidad de dicha clasificación va dada por la centralización o dispersión de los equipos que componen la instalación de frío de los cuales se dividen en tres subtemas

5.3.2.1. Sistema centralizado

Por su diseño e instalación, los sistemas de aires acondicionados centralizados son los únicos equipos que cuentan con la capacidad de distribuir aire climatizado a todas las áreas específicas que usted desee en un recinto; debido a que cuenta con una central donde se enfría o se calienta el agua o el aire que posteriormente será distribuido a los distintos espacios, pisos o habitaciones que usted desee climatizar; además, en la misma central se realiza el tratamiento completo del aire, es decir, en caso tal se emplee aire, se tendrá un filtrado, la mezcla con aire exterior, impulsión, entre otros procesos. (Miranda, 2005b)

5.3.2.2. Sistema semicentralizado

Por su diseño e instalación, los sistemas semicentralizados son aquellos equipos que se instalan para climatizar un recinto que sea lo suficientemente espacioso, un ejemplo claro de esto, es cuando un sistema de aire acondicionado semicentralizado es instalado para obtener la cobertura total de un piso en un edificio el cual abarca una gran variedad de oficina(QUADRI, 2001a). En este sistema existe una parte común del proceso de acondicionamiento que se realiza en una central y otra parte que se lleva a cabo en el mismo local que se desea climatizar.

5.3.2.3. Sistema descentralizado

Por su diseño e instalación, los sistemas descentralizados son conocidos comúnmente como sistemas individuales por lo que emplean maquinas individuales que realizan el tratamiento completo del aire en cada local que se desea climatizar.(Miranda, 2005b)

5.3.3. Clasificación según la potencia

La clasificación según la potencia es directamente proporcional a la clasificación según de velocidad del aire, cabe resaltar que esta última solo es tomada en cuenta para los sistemas de aire. Sin embargo, se destacan dos subdivisiones.

5.3.3.1. Sistemas con equipos de gran potencia

Son conocidos por ser los sistemas con mayor consumo de potencia, estos cuentan con un registro mayor a los 6KW, en cuanto a su alta velocidad esta se encuentra comprendida entre 11 y 25 m/s(Miranda, 2005c). Dentro de esta clasificación están los sistemas de aires acondicionados centrales y los semicentrales.

5.3.3.2. Sistemas con equipos de baja potencia

Son conocidos por manejar un consumo de potencia entre 1 y 6 KW, además se encuentra registrado como un sistema de baja velocidad por lo que no sobre pasa los 11 m/s. Dentro de esta clasificación están los sistemas de aires acondicionados individuales. (Miranda, 2005b)

5.3.4. Clasificación según el tipo de sistemas

La clasificación según el tipo de sistema va dada por los fluidos de distribución y todo lo relacionado con el tipo de equipamiento a emplear en un ciclo de refrigeración de un aire acondicionado. Para explicar lo dicho anteriormente es necesario dividirlo en dos temas y estos a su vez dividirlos en subtemas. (Miranda, 2005b)

5.3.4.1. Expansión directa

Los sistemas de expansión directa son conocidos comúnmente como todo refrigerante, debido a que el refrigerante es el encargado de enfriar directamente el aire que se distribuye a los locales en los elementos del equipo, formando la manera más efectiva de lograr el objetivo de enfriar y deshumectar el aire, dado que logra el intercambio directo con el refrigerante. (QUADRI, 2001b)

5.3.4.2. Autocontenidos

Los autocontenidos son aquellos equipos que cumplen con la característica de poseer un solo mueble o carcasa, en el cual se constituye la unión de todos los elementos que componen el ciclo de refrigeración, explicado con anterioridad. Los autocontenidos competen dos subdivisiones entre las cuales tenemos: 1) Autocontenido para exteriores: Se reconocen por ser instalados por fuera del área debido a que emplean conductos sin

derivaciones para climatizar dicho lugar; un ejemplo claro de estos equipos son los acondicionadores de cubierta o techo (Roof-Top). 2) Autocontenido para interiores: Se reconocen por ser instalados directamente en el área que se desea climatizar, un ejemplo claro de estos equipos son los Wall Mounted, WLHP, entre otros. (QUADRI, 2001b)

5.3.4.3. Todo refrigerante (Split-systems)

Los sistemas Split o también conocidos como sistema todo refrigerante son equipos formados por unidades terminales en el espacio acondicionado, constan de un conducto de expansión directa con ventilador que recircula el aire del local, el cual es alimentado con refrigerante transportado por cañerías desde una unidad condensadora ubicada en el exterior(QUADRI, 2001f). La calefacción se da generalmente empleando los mismos sistemas mediante la bomba de calor y se puede dividir en tres partes:

5.3.4.4. Split Simple (mini Split)

Es conocido por ser un sistema de expansión directa, sin embargo, se diferencia de los unitarios con equipos contenedores por lo que estos emplean unidades divididas por dos gabinetes (uno exterior y otro interior) con el fin de lograr una separación en el circuito de refrigeración, la zona de evaporación en el interior con la zona de condensación en el exterior. Cabe resaltar que, ambas unidades van enlazadas por medio de tuberías de cobre para la conducción del refrigerante.(QUADRI, 2001f)

5.3.4.5. Sistema Multi Split:

Es conocido por ser un acondicionador de aire para habitaciones, consiste en una unidad interior y una unidad exterior, sin embargo, el sistema separado multisplit produce unas simplificaciones en el caso de varios locales, debido a que emplea una sola unidad

condensador exterior, a la cual se le puede vincular de dos hasta seis unidades interiores, siendo esta la capacidad total de enfriamiento del sistema determinado por la unidad exterior.

5.3.4.6. Sistema refrigerante variable (VRV)

Sus siglas hacen referencia a volumen de refrigerante variable; este sistema establece una alternativa a las diversas posibilidades de configuración de sistemas de aire acondicionado tipo todo refrigerante que requiere un recinto, siendo capaz de proporcionar calefacción y refrigeración al mismo tiempo o eventualmente. (QUADRI, 2001f)

5.3.4.7. Expansión indirecta

Los sistemas de expansión indirectos son denominados en el mercado laboral como de agua enfriada debido al comportamiento que posee la enfriadora de líquido; además es uno de los pocos sistemas que emplean un segundo fluido termodinámico para climatizar el aire; normalmente, el segundo líquido refrigerante mencionado anteriormente puede llegar a ser agua o aire(QUADRI, 2001b). Los sistemas de expansión indirecta pueden clasificarse en cuatro subtemas.

5.3.4.8. Sistema Todo Aire

Como su nombre lo indica, es un sistema que emplea únicamente aire frío o aire caliente en su funcionamiento respecto a la climatización del lugar; debido a las numerosas variables de este método es válido destacar el número de conductos empleados para este sistema, lo que lo hace clasificarse de la siguiente manera:

- a) Monoconductos: Es referenciado por emplear un único conducto para la distribución del aire.

- b) Doble conducto: Es conocido por emplear dos conductos para la distribución del aire, puede ser utilizado uno para aire frío y otro para aire caliente o ambos para aire frío. (QUADRI, 2001f)

5.3.4.9. Sistema Todo Agua

Su funcionamiento se basa en emplear únicamente agua, este sistema posee una unidad central, la cual es la encargada de enfriar y calentar el agua cuando pasa a través de ella, además se encarga de la distribución de este fluido a través de los conductos que llegan a los locales; es decir; los sistemas Todo Agua son aquellos en los que en el recinto a climatizar se instalan unidades terminales compuestas por un serpentín y un abanico (unidades Fan-Coil, del inglés). A través del serpentín circula agua fría que proviene de una unidad enfriadora de agua, que se encuentra alejada del recinto a climatizar. El agua fría es impulsada por un compresor y se transporta a través de tuberías especiales hasta cada una de las unidades terminales. El abanico de la unidad terminal se encarga de circular el aire del recinto a climatizar poniéndolo en contacto con el serpentín. En estos sistemas el fluido termodinámico empleado para climatizar es el agua. (QUADRI, 2001e)

5.3.4.10. Aire Agua

Su funcionamiento está basado en una fusión, es decir, son sistemas mixtos, donde los locales acondicionados están servidos por unidades terminales ubicados de los locales y suministran el aire denominado secundario y el designado como primario, estos provienen de unidades de tratamiento de aire remoto. Los fluidos que se emplean es agua fría o caliente, la cual es proveniente de una caldera considera Fan Coil.(QUADRI, 2001c)

5.3.1. Control automático

“El control automático es el mantenimiento de un valor deseado para una cantidad o condición física, midiendo su valor actual, comparándolo con el valor referencia, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla mediante una acción correctiva. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana”

5.3.2. Técnicas de control

El principio de todo sistema de control automático es la aplicación del concepto de realimentación o feedback (medición tomada desde el proceso que entrega información del estado actual de la variable que se desea controlar) cuya característica especial es la de mantener al controlador central informado del estado de las variables para generar acciones correctivas cuando así sea necesario. Este mismo principio se aplica en campos tan diversos como el control de procesos químicos, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas herramientas, control de variables a nivel médico e incluso en el control de trayectoria de un proyectil militar existen varias técnicas de control pero (Afram & Janabi-Sharifi, 2014) realiza una clasificación de estas técnicas para los sistemas de climatización como se describe en la figura 2, rescatando que existe un gran porcentaje de compañías que emplean las técnicas de control clásico, pero rescata que la técnica de control más óptima es la del modelo de control predictivo, haciendo énfasis que esta técnica necesita un controlador con gran capacidad de procesamiento para su correcto funcionamiento.

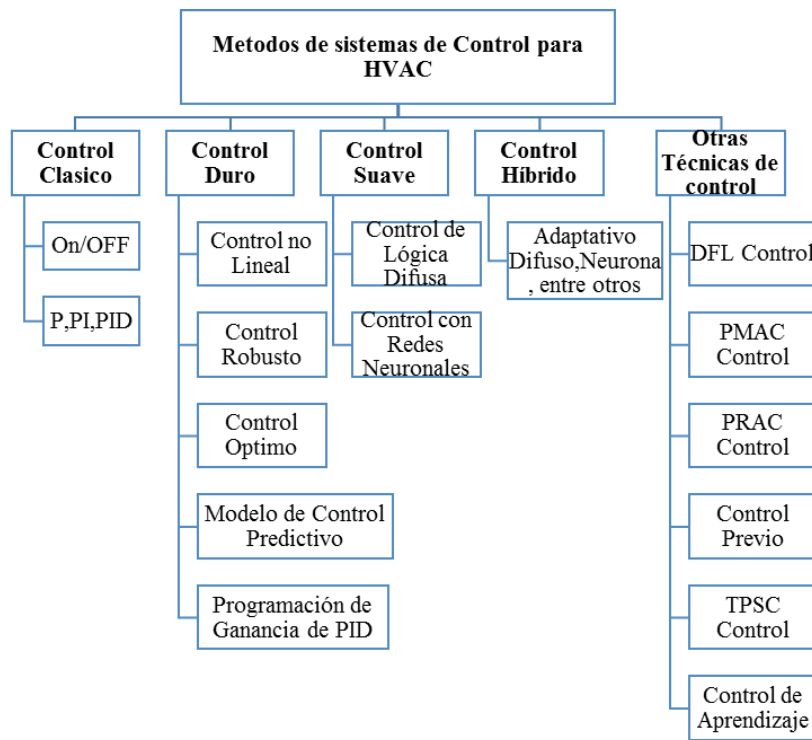


Figura 2. Taxonomía de las técnicas de Control.

Fuente: Tomda de Afram & Janabi-Sharifi, 2014.

5.3.3. Sistemas de control clásicos:

Este sistema de control maneja dos formas las cuales son control on/off y los controles P, PI y PID. En el control on/off, el elemento final de control solo ocupa una de las dos posiciones posibles donde solo hay dos opciones o umbrales, un umbral alto y un umbral bajo para regular los procesos dentro de los límites establecidos. En cambio los controles P, PI y PID, poseen una retroalimentación lineal que constantemente obtiene una señal de error que es amplificada antes de entrar al proceso.

El control PI es una mezcla entre un controlador proporcional, el cual posee una respuesta casi instantánea, con un controlador integral, el cual actúa durante intervalos de tiempo; este sistema posee una respuesta rápida que viene de la salida del control

proporcional pero con un error, sin embargo este error es eliminado gracias al controlador integral.

Por su parte el control PID brinda mayor seguridad al momento de tener control bajo condiciones específicas de funcionamiento mientras que el control on/off en adición se presentan oscilaciones de los puntos de ajuste. La siguiente figura representa el diagrama de bloques para un proceso de control PID.

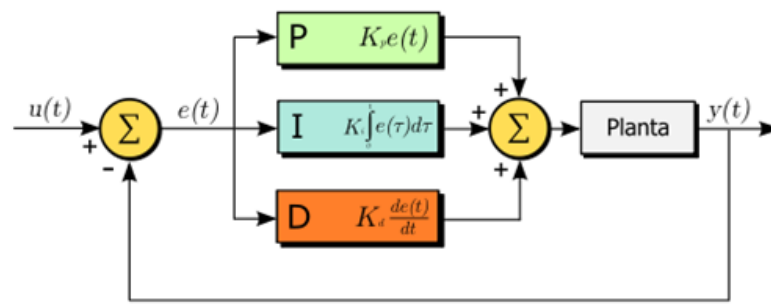


Figura 3. Diagrama de bloques del controlador PID.

Fuente: Elaboración propia

5.4. Internet de las Cosas – IoT

El *IoT* en español conocido como el Internet de las cosas, se asocia a una red interconectada de objetos que se comunican entre sí por medio de internet y generan datos para otros sistemas. Está basado en dispositivos embebidos dotados de sensores, actuadores y módulos de procesamiento e interconectividad para la toma de decisiones sin intervención humana (Atzori et al., 2010)(Madakam, Ramaswamy, & Tripathi, 2015)(Colina, Vives, Zennaro, Bagula, & Pietrosemoli, 2016).

Actualmente IoT se le denomina a la red de redes, gracias a la facultad de prestar servicios entre distintas redes individuales, valiéndose del análisis y la administración de los datos recolectados como se ilustra en la figura 4. Se destaca que uno de los objetivos del

IoT se centra en el uso racional de la energía por parte de los equipos y tecnologías participantes.



Figura 4. Internet de las cosas.

Fuente: (Evans et al., 2011).

El *IoT* nace de una visión de un reconocido investigador del MIT, quien dio a conocer el paradigma de internet de las cosas, luego de esto compañías como el Grupo de soluciones empresariales basadas en Internet (IBSG, Internet Business Solutions Group) de Cisco, definían el comienzo de la era IoT, como el punto en el tiempo que se conectaron a internet más cosas que personas, según (Evans et al., 2011) (Alavi, Jiao, Buttlar, & Lajnef, 2018) este suceso ocurrió entre 2008 y 2009, la figura 5 evidencia que en la actualidad los dispositivos conectados a internet duplican la población mundial.

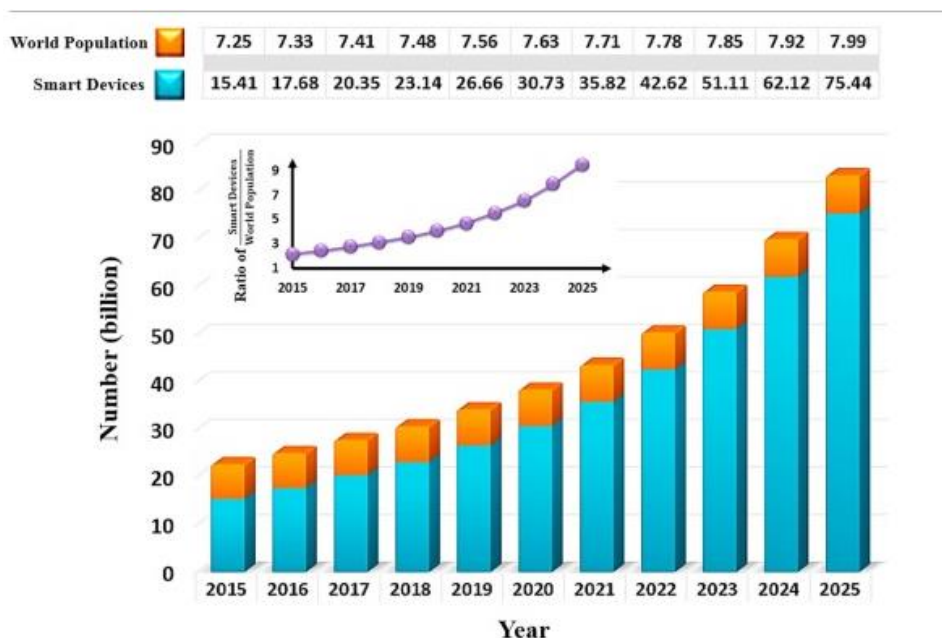


Figura 5. Relación población mundial respecto dispositivos conectados a internet.

Fuente: (Alavi et al., 2018)

IoT representa una evolución del internet, capaz de recolectar datos para su posterior almacenamiento, tratamiento y análisis; permite generar información susceptible para la aplicación de herramientas de BigData. Sin embargo, existen retos aún sin resolver, que no permiten el desarrollo total del IoT, tales como: el diseño de fuentes de alimentación para los miles de millones de sensores de tamaño micro, la existencia de un protocolo de comunicación capaz de soportar la gran cantidad de conexiones, la adaptación de la IPv6 y estándares que permitan regular el correcto funcionamiento del ecosistema IoT (Evans, 2011).

5.4.1. Arquitecturas cliente servidor para IoT

Esta arquitectura se basa en la comunicación entre dos objetos donde el cliente realiza solicitudes al servidor y este es el encargado de atenderlas, estos dos objetos físicamente pueden encontrarse distantes pero se encuentran comunicados a través de una

red para poder realizar tareas en conjunto. A continuación, se presenta un análisis de las arquitecturas orientadas a internet de las cosas (IoT) y dos tipos de paquetes de tecnologías para el desarrollo de páginas web más conocidas y utilizadas.

5.4.1.1. Protocolo MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetric Transport) es un protocolo de mensajería ligero y sencillo, se basa en el principio de cliente/servidor, está diseñado para tener una mínima sobrecarga que lo hace una buena y óptima solución para aplicaciones M2M (machine to machine, 'máquina a máquina'), este protocolo está orientado a la comunicación de datos obtenidos por sensores, debido a que consume poco ancho de banda logrando ser utilizado en la mayoría de los dispositivos con pocos recursos de RAM y CPU. (Andrew Banks and Rahul Gupta, 2013)

La fundamental ventaja que brinda este método de comunicación es el desacoplo que se produce entre los publishers y los subscribers, gracias a la intermediación del bróker (un intermediario que gestiona el tránsito de los mensajes). Este servidor, recopila los datos que los publishers le transmiten, luego estos datos recopilados por el broker se enviarán a determinados publishers que previamente se lo hayan pedido al intermediario como se muestra en la figura 6.

Este protocolo implementa hasta tres niveles de QoS (Quality of Service) para garantizar, que los mensajes son entregados de forma correcta a los dispositivos suscritos al contenido. Cuanto más alto el nivel, más íntegro y seguro es la transmisión de datos, pero genera una demanda mayor en el ancho de banda.

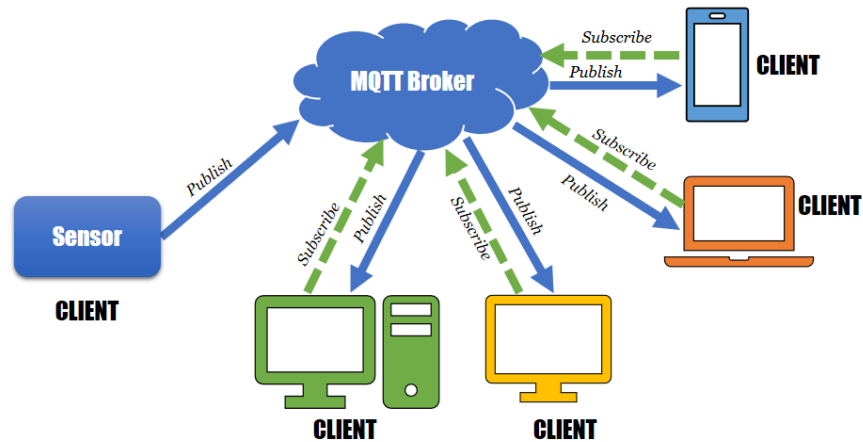


Figura 6. Arquitectura MQTT.

Fuente: Tomada de Andrew Banks and Rahul Gupta, 2013.

Además, el broker es capaz de mantener el mensaje incluso después de ser enviado a los nodos subscritores, de manera que, si se producen nuevas suscripciones a los topics (temas) de los mensajes retenidos, estos se envían a los nuevos clientes. Es muy eficiente este método de comunicación ya que, no se necesita saber para quien van los mensajes o de donde vienen, reduciendo mucho la complejidad de la red, al basarse en comandos muy sencillos y en varios modos de gestión de mensajes, no necesita que el contenido del mensaje esté en un formato específico ilustrado en la figura 7.

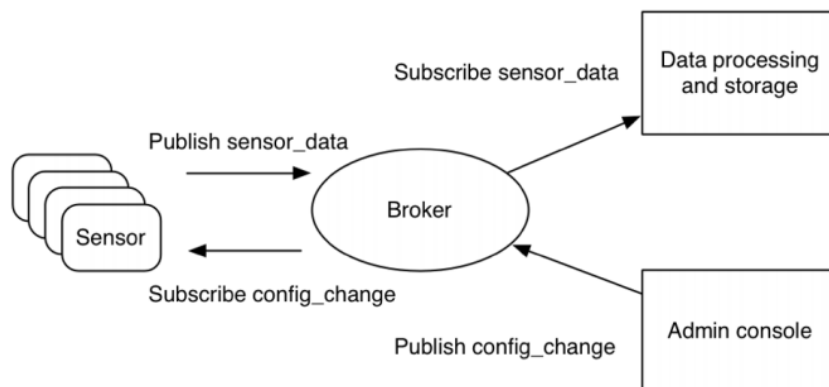


Figura 7. Modelo de publicación y suscripción de MQTT.

Fuente: adaptado de (Yuan, 2018).

En la tabla 1 observamos las diferencias de los protocolos Mqtt y Http, evidenciando que MQTT nos ofrece practicidad a la hora de implementarlo en una red de monitoreo y control, dado que la orientación va centrado a la información. Así mismo nos permite enviar mensajes pequeños que en tiempo y comunicación se traduce a menor ancho de banda y rapidez a la hora de enviar y recibir un mensaje.

Tabla 1.

Comparativo entre los protocolos utilizados para IoT.

	MQTT	HTTP
Orientación de dato	Centrado en la información	Centrado en el documento
Transacción del Mensaje	Publica / Suscribe	Petición / Respuesta
Complejidad del protocolo	Simple	Complejo
Tamaño del mensaje	Pequeño 2 bytes	Mayor (usa formato de texto no binario)
Nivel de servicios	Tres configuraciones	Todos los mensajes por igual
Librerías	Librerías para C (30 KB) Java (100 KB)	Depende de la aplicación (JSON, XML) no muy pequeñas
Configuración de la comunicación	Soporta desde 1 a 0 a 1 a muchos	Solo 1 a 1

Fuente: Elaboración propia

5.4.2. Principales tecnologías utilizadas en los sistemas orientados a Internet de las Cosas IoT

5.5. Tarjeta de desarrollo NODEMCU v3

Una NodeMCU es una sistema embebido de desarrollo de hardware y software libre ver figura 8, basada en el chip ESP8266 que internamente posee un microcontrolador y un módulo WIFI, Esta placa permite crear proyectos para IoT de manera económica.



Figura 8. Tarjeta NodeMCU v3.

Fuente: Tomada de http://nodemcu.com/index_en.html.

5.5.1.1. Tarjeta de desarrollo ARDUINO

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto, posee hardware y software que presenta una interfaz fácil de utilizar e implementar, Esta tarjeta puede comunicarse con otros dispositivos con microcontrolador a través del lenguaje de programación Arduino basado en cableado y el software arduino (IDE).

Este sistema es económico, multiplataforma, posee un entorno programable sencillo, su software y hardware es de código abierto y extensible, en la figura 9 se presentan algunas de las diversas placas de Arduino que se encuentran en el mercado cada una con características similares pero poseen alguna cualidad que los diferencia como por ejemplos el número de entradas y salidas que poseen.



Figura 9. Arduino uno, leonardo y101. .

Fuente: Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoard>.

5.5.1.2. Raspberry

Es un pequeño ordenador su tamaño como se ilustra en la figura 10, muy similar a una placa de Arduino, con este equipo se pueden realizar diferentes funciones, se puede conectar un monitor, un teclado y un mouse. Su hardware no es 100% de uso libre sin embargo su software si, el software utilizado es el Raspbian el cual es un sistema operativo basado en Debían.



Figura 10. Tarjeta Raspberry pi 3.

Fuente: tomando de <https://www.raspberrypi.org/>.

Dentro de sus características, posee puertos USB, ranura para tarjeta SD y microUSB, puerto Ethernet, también se puede conectar a una red, conector de audio, puerto HDMI, puertos GPIO, entre otras funciones.

5.5.1.3. Comparativo Arduino, Raspberry y NodeMcu v3

En la tabla realiza una comparación entre estas tres diferentes tarjetas de desarrollo se evidencia que: Arduino y NodeMCU poseen Microcontrolador pero Raspberry posee un microprocesador lo que brinda muchas más funciones y una mayor Estabilidad para

desarrollar proyectos tecnológicos, además, permite una parte de programación más avanzada que la de un Arduino, quien carece de conexión a internet al menos que se conecte a un SHIELD, mientras que el NodeMCU posee integrado un módulo WIFI sin embargo sigue siendo un Microcontrolador.

Tabla 2.

Comparación entre Arduino, Raspberry y NodeMcu

ARDUINO	RASPBERRY	NodeMCU
Microcontrolador	Microprocesador	SoC (Microcontrolador +módulo WIFI)
No tiene sistema operativo	Raspbian	XTOS
Necesita SHIELD para conectarse a ethernet	Puerto con conexión a Ethernet	Conexión a Wifi
16MHz	700MHz	80 a 160MHz
C o JAVA	Python	LUA, C, C++

Fuente: Elaboración propia

Por lo anterior, al momento de elegir que tarjeta utilizar, se recomienda la que se adecue a los requisitos de diseño del sistema, para algunos en todos los casos utilizar una raspberry pi es la mejor solución. Pero si solamente se va a monitorear 3 variables y controlar 1, se recomienda una NodeMcu es de bajo costo, posee poco consumo energético y encaja perfectamente a los requisitos del sistema planteado.

Materiales

En esta etapa se realiza una descripción de los equipos utilizados para el proyecto, como son, el ordenador portátil usado para la adquisición de los datos, el entorno de desarrollo integrado de Arduino versión 1.8.7, el sistema operativo para la tarjeta de desarrollo NodeMcu v3.0, Sensor de Temperatura y Humedad DHT21, el sensor de corriente no invasivo ECS1030 y los módulos sensor emisor (KY-005) y receptor (KY-022)

La versión de *Arduino Ide* utilizada es la 1.8.7, ejecutada en un computador marca *Apple MacBook Air Core i5* de 64bits, con frecuencia de reloj de 1,60 GHz, 8GB de memoria *RAM* y sistema operativo *macOS Sierra* 10.12.5.

Arduino posee librerías necesarias para el manejo de los diferentes módulos y Tarjetas de desarrollo con las que es compatible, cada módulo para la adquisición de datos se integra a una librería, que permite el adecuado funcionamiento entre las Tarjetas de desarrollo y los dispositivos finales.

6. Tarjeta de Desarrollo NodeMcu V3.0

Es una placa de control basada en el módulo wifi ESP8266 / ESP12E, su lenguaje de programación nativo es el LUA, pero es compatible con el entorno de programación Arduino IDE, es ideal para proyectos de electrónica y robótica avanzados, que necesiten una gran potencia de proceso y comunicaciones wifi. Está equipado con 10 GPIO, PWM, I2C, 1-wire y ADC (Eguílaz, 2017) (ver figura 11)

sistemas IoT. En este orden de idea se presenta un breve análisis de los sensores escogidos el sensor digital *SHT11* para la medición de temperatura y el sensor de corriente no invasivo ECS1030.

7.1. Sensor DHT21

Para la medición de temperatura y humedad del suelo se escogió este sensor, desarrollado por la empresa Aosong (Aosong, 2018). Basado en un microcontrolador de 8 bits y el sensor de humedad y temperatura AM230, ver tabla 4. Se puede garantizar mediciones con precisiones muy confiables ver la figura 12, donde se observa el sensor junto a su carcasa (SENSIRION, 2003).



Figura 12. Sensor Dht 21 aspecto externo e interno.

Fuente tomada de: (SENSIRION, 2003).

Tabla 4.

Características del sensor DHT21.

Alimentación:	3 – 5,2 V DC
Temperatura:	-40°C a 80°C
Precisión temperatura:	0,5°C
Humedad:	0 a 99%
Precisión humedad:	3%
Consumo energético:	40μW normalmente

Fuente: tomada de (Aosong, 2018)

7.2. Sensor de corriente no invasivo ECS1030

Desarrollado por la empresa Echun Electronic Co., Ltd, Es un sensor de corriente no invasivo (también conocido como "transformador de corriente") puede sujetarse alrededor de la línea de suministro de una carga eléctrica para indicarle la corriente que pasa a través de él. Su principio de medida es utilizando un inductor y respondiendo al campo magnético alrededor de un conductor portador de corriente. Al leer la cantidad de corriente producida por la bobina, puede calcular la cantidad de corriente que circula a través del conductor (Echun Electronic Co., 2018). Este sensor de corriente en particular medirá una carga de hasta 30 amperios ver tabla 5.3.

Tabla 5.

Características del sensor ECS1030.

Rango de Corriente:	15 mA a 30A
Temperatura de operación:	-40 ° C a 65 ° C
Exactitud de medida:	2%
Linealidad de Medida:	0.5%

Fuente: (Echun Electronic Co., 2018)

Este sensor no tiene una resistencia de carga incorporada, por lo que en la mayoría de los casos será necesario colocar una resistencia en la salida como se ilustra en la figura 5.3 el sensor para convertir la corriente inducida de la bobina a un voltaje medible muy pequeño. (Echun Electronic Co., 2018).



Figura 13. Sensor de corriente No invasivo ECS1030.

Fuente : tomada de (Echun Electronic Co., 2018).

7.3. Módulos sensor emisor (KY-005) y receptor (KY-022)

Un diodo emisor de luz infrarroja (IR LED) es un LED de propósito especial que emite rayos infrarrojos que tienen una longitud de onda de 700 nm a 1 mm. Diferentes LEDs IR pueden producir luz infrarroja de diferentes longitudes de onda, al igual que diferentes LEDs producen luz de diferentes colores. Los LED de infrarrojos generalmente están hechos de arseniuro de galio o arseniuro de galio y aluminio. En complemento con los receptores IR, estos se utilizan comúnmente como sensores (electronicapty, 2018a).



Figura 14. Modulo emisor infrarrojo.

Fuente :Tomada de (electronicapty, 2018a).

La apariencia de IR LED es la misma que la de un LED común como se ilustra en la figura 5.4. Dado que el ojo humano no puede ver las radiaciones infrarrojas, no es posible que una persona identifique si un LED IR está funcionando. Una cámara en una cámara de teléfono celular resuelve este problema. Los rayos IR del IR LED en el circuito se muestran en la cámara.

El módulo de recepción (KY-022) de infrarrojos, ver figura 15, es un módulo que posee una importante resistencia a la luz y a fuertes interferencias electromagnéticas debido a su función de infrarrojos IC dedicado, puede trabajar bajo 500 lux de intensidad luminosa, lo que lo hace robusto además de ser de fácil uso. Una gran ventaja es que se puede usar cualquier control remoto (electronicapty, 2018b).



Figura 15. Módulo receptor de infrarrojos KY-022.

Fuente: (electronicapty, 2018b).

7.4. Módulos sensor de Voltaje

Este sensor es básicamente un transformador reductor de tensión, al cual se le adaptó un circuito de rectificación de onda completa y divisor de tensión, para su acoplamiento con la placa Arduino. La salida de este sensor es analógica, por ende, debe conectarse al puerto de entrada analógico del Arduino.

El primario del transformador se conecta en paralelo con la alimentación del Aire acondicionado (AC), su función es tomar una muestra del valor de tensión que alimenta al

AC y entregarla a un circuito de acoplamiento entre el transformador y la placa Arduino Mega2560. En la figura 16 se muestra el circuito de acoplamiento

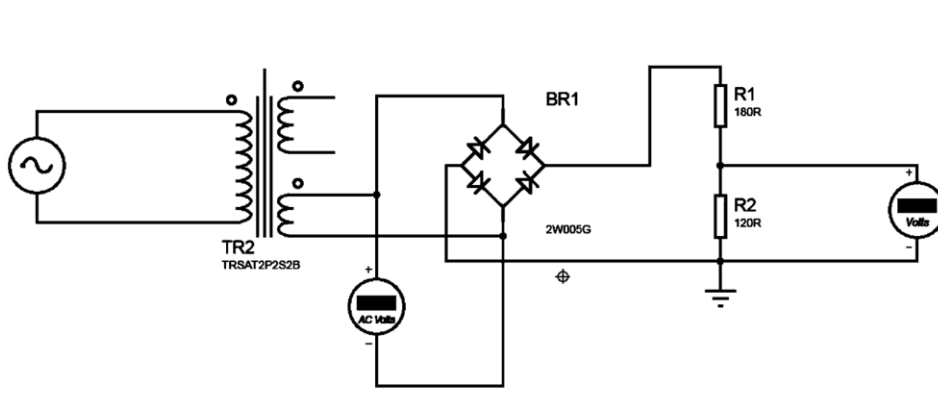


Figura 16. Circuito para sensor de voltaje.

Fuente: elaboración propia.

Metodología

8. Tipo, enfoque y alcance de la investigación

Para la solución de este trabajo se realizará una investigación de desarrollo tecnológico con un enfoque mixto, que aportará al conocimiento incluyendo mejoras en los sistemas de Climatización AC, considerando la temperatura externa y la exactitud de la temperatura deseada (set point). Esta investigación se centra en un análisis descriptivo donde se presenta el diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo en sistemas de climatización tipo mini Split.

9. Diseño de la investigación

Para el desarrollo del sistema de control y monitoreo para sistemas de climatización, se indagó inicialmente sobre los sistemas de monitoreo para equipos HVAC, plataformas de internet de las cosas IoT, parámetros y variables necesarias para el diseño e

implementación, sistemas de control en dispositivos HVAC. Lo anterior, por medio de revisiones en la literatura. Luego se identificó el hardware, sensores y tipo de comunicación adecuados para implementar un prototipo de pruebas. Paralelo a esto, se determinó el tipo de lenguaje y plataforma de despliegue rápido, con la cual se desarrolló la interfaz gráfica de visualización los datos adquiridos por el sistema.

Luego de diseñado el prototipo se realizaron capturas de variables para caracterizar el sistema y se identificó la técnica de control que optimiza el consumo energético del mismo. Luego se ejecutaron pruebas para validar la arquitectura diseñada. Con los resultados obtenidos, se seleccionó el tipo de comunicación más apropiado.

Se establecieron 4 fases de las cuales se desprendieron actividades que permitieron el alcance de la investigación, utilizando como base la metodología propuesta por Sampieri en el libro metodología de la investigación (Sampieri, Collado, & Lucio, 2014).

Para lograr el objetivo general se proponen las siguientes fases:

9.1. Fase de Análisis (Fase 1)

La primera fase del proyecto comprende la identificación de las variables de interés en los sistemas de climatización. A partir de estas variables se seleccionaron los sensores de acuerdo a la naturaleza y magnitud de las mismas. Además, se seleccionó la tecnología adecuada para la adquisición de datos, considerando la revisión bibliográfica, tecnologías disponibles y antecedentes de esta investigación.

9.2. Fase de Diseño (Fase 2)

En esta fase se determinó la plataforma para el manejo de los datos suministrados por los sensores. Además, se diagramó la arquitectura del sistema y definiendo el protocolo de comunicación a utilizar y realizando pruebas de tiempo respuesta para su elección.

9.3. Fase de Implementación (Fase 3)

En esta fase se escribió el código de programación para los sensores, actuadores y envío bidireccional de información a plataforma web. Además, se realizó el montaje del sistema en un recinto cerrado. Finalmente, en esta fase se ejecutó el arranque del equipo con la instrumentación, la puesta a punto del sistema y la instalación del sistema en un equipo de refrigeración doméstico.

9.4. Fase de Validación (Fase 4)

En esta fase final se recopilaron los datos que son utilizados para la toma de decisión automática del dispositivo, análisis y resultados, conclusiones y consideraciones futuras, para un sistema de climatización tipo mini split.

Con el cumplimiento de las etapas se logró el objetivo general de la investigación, proponiendo un sistema de control y monitoreo de consumo energético para equipos de climatización en edificaciones tipo interior utilizando protocolos de comunicación orientados a Internet de las cosas (IoT).

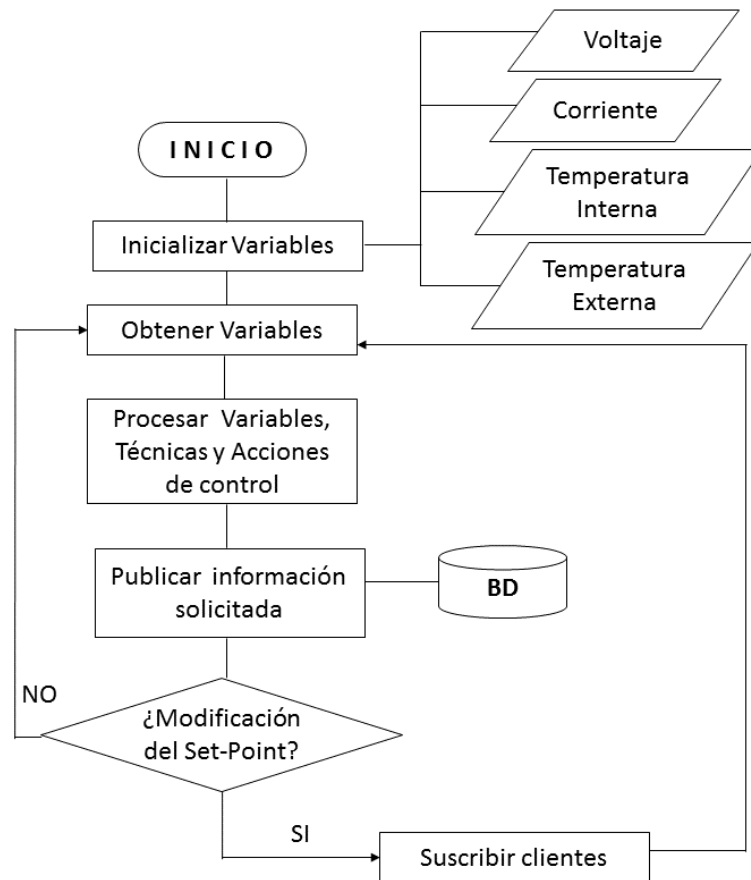


Figura 17. Flujograma de la solución.

Fuente: Elaboración propia.

10. Desarrollo del sistema de monitoreo y control

10.1. Análisis de las variables para la caracterización del sistema y recinto.

Por medio de la revisión del estado del arte realizada, respecto a la tecnologías de climatización, sistemas de control en equipo de climatización, indicadores de confort térmico y las tecnologías de IoT, se seleccionaron las variables características o representativas para un sistema de climatización tipo interior; temperatura externa, temperatura interna, corriente y voltaje. Además, las técnicas de control que permiten hacer

acción sobre los sistemas de climatización y los dispositivos de comunicación que permiten la interacción basado en el concepto de internet de las cosas IoT. Para poder evaluar el sistema en toda plenitud, se tomó un equipo de climatización marca Milexus de 12000 Btu ver tabla 6.1.

Tabla 6.

Características del Equipo en estudio.

Capacidad	12000 Btu/h
Corriente Nominal	11.5A
Corriente Máxima	15.0A
Potencia Nominal	1300 W
Potencia Máxima	1690 W
Voltaje Nominal	110 V
Frecuencia Nominal	60Hz

Fuente: Elaboración propia

10.2. Diseño y simulación del sistema de control de AC

Para la caracterización del equipo de climatización se utilizó una placa de Arduino Mega, conectando a ella los sensores de corriente y temperatura, ver figura 6.1. La medición de la tensión de la red se registró manualmente en la base de datos durante periodos de seguimiento al el funcionamiento del sistema. La información obtenida de los sensores es transmitida por el Monitor Serial del IDE Arduino y luego es capturada para respectivo procesamiento de los datos, en el entorno de desarrollo de Matlab r2018b.

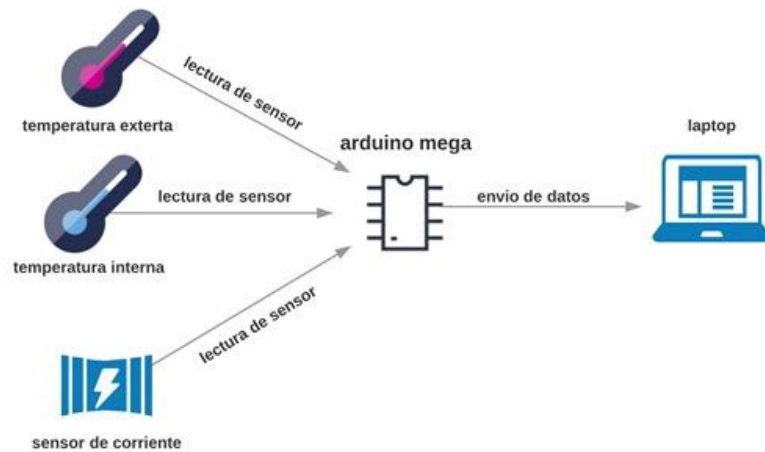


Figura 18. Arquitectura para la captura de datos iniciales.

Fuente: elaboración propia.

Partiendo de los datos recolectados para la caracterización del sistema, se realiza la identificación de la técnica de control que usa el equipo y se realiza una simulación con las tres técnicas de control clásico que posee Matlab r2018b ver figura 19. La técnica de control clásico proporcional integral (PI), es la apropiada para alcanzar el set point, con la menor cantidad de esfuerzo posible, ver figura 19 la gráfica de color rojo indica el comportamiento del set point vs temperatura deseada.

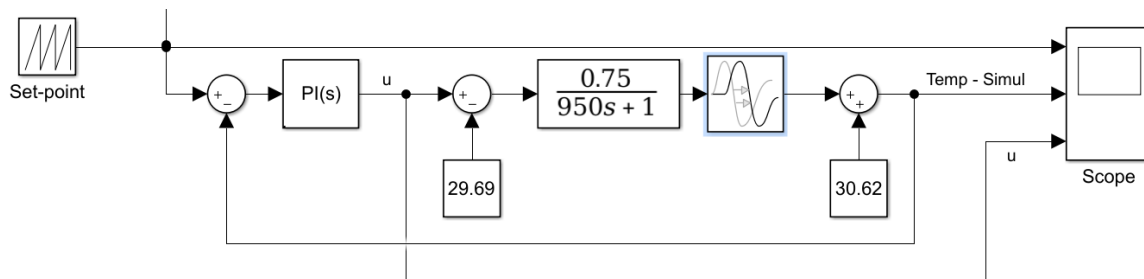


Figura 19. Diagrama de bloques y ecuación de transferencia del sistema.

Fuente: Elaboración propia

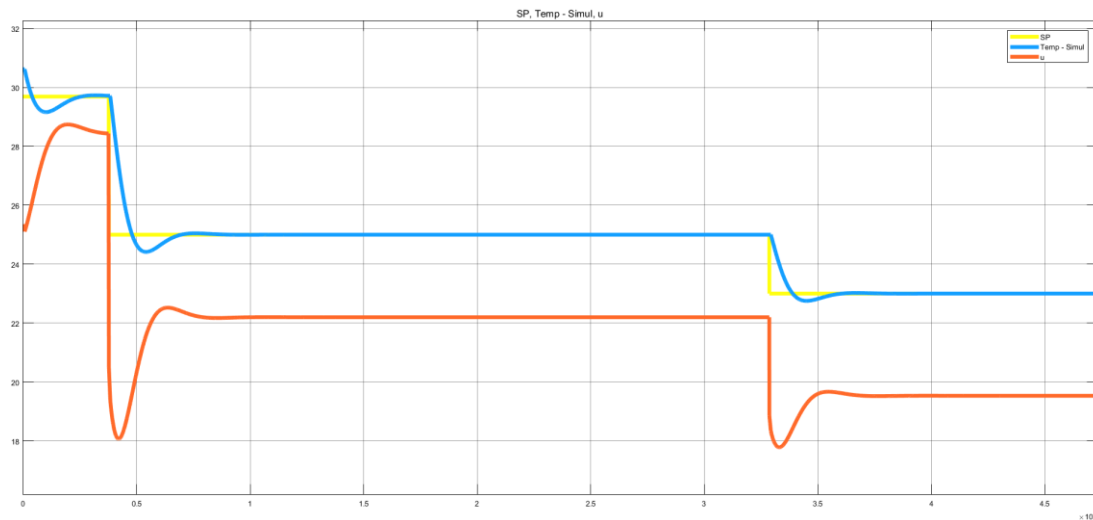


Figura 20. Simulación de la técnica de control clásico Proporcional Integral.

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar acciones de control en el equipo de climatización, primero se hizo uso del receptor de infrarrojos KY-022 y un Arduino ver figura 21, con el que se decodifican los códigos IR del control remoto del equipo. Luego se relacionan dichos códigos con la acción que ordenan para usar los correspondientes a las acciones de control deseadas.

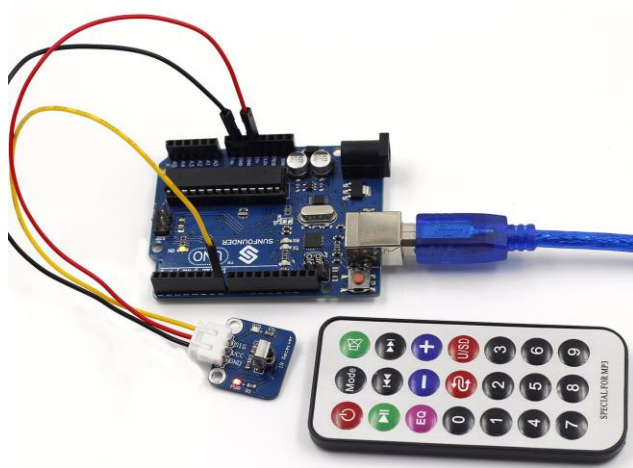


Figura 21. Conexiones para decodificar los código IR.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo identificado el tipo de control, los sensores de variables a monitorear en el sistema y la decodificación de códigos IR, se seleccionan el hardware y el software

necesario para comunicar los sensores y actuadores a internet. La selección del hardware está basado en la comparativa de las tarjetas de desarrollo realizada en el apartado 4.6.4, seleccionado como mejor alternativa para esta aplicación la tarjeta NodeMcu V1.0. Lo anterior se soporta en que las variable en estudio no son críticas en el tiempo, sumado a lo anterior la temperatura de un recinto y temperatura ambiente, son variables que poseen una razón de cambio lenta. Además, esta tarjeta posee integrado un chip ESP 8266 que emplea el protocolo WiFi IEEE 802.11 y su configuración es compatible con el IDE Arduino. La aplicación web utilizó una plataforma en el software PHP alojado en un servidor en la nube con dominio propio que facilita almacenar históricos de datos.

Seguido de lo anterior, el protocolo de comunicación, para este caso se selecciona el protocolo MQTT, basado en el comparativo realizado en el apartado 4.5.1.2. Entre el protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP) y el protocolo MQTT, donde se evidencia que este último posee las características adecuadas para el fin de este proyectos.

Después de seleccionar los componentes que hacen parte del sistema, se propone un arquitectura basada en el protocolo MQTT adoptando el modelo de publicación y suscripción mencionado en la sección 5.5.4.1.1, para realizar la comunicación entre los dispositivos empleados.

En la figura 22 se ilustra la arquitectura final del sistema de monitoreo y control, luego de obtenida la información de la caracterización del equipo a intervenir.

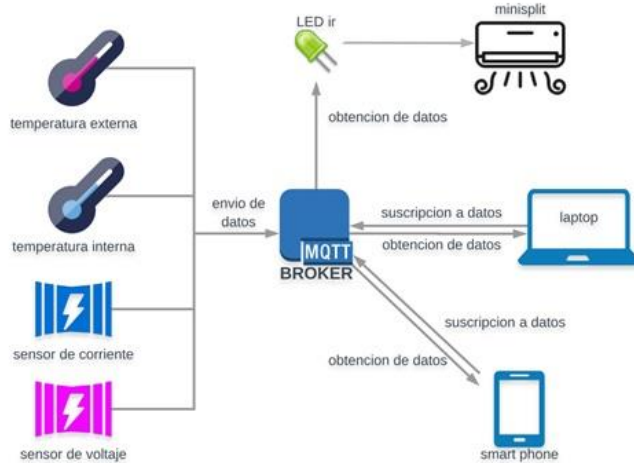


Figura 22. Arquitectura del sistema usando el protocolo MQTT.

Fuente: elaboración propia.

10.3. Implementación del sistema de control de AC en un recinto.

En las Figura 24, se muestra la conexión del sensor de corriente no invasivo ECS1030 y el sensor de voltaje. En la figura 25 se observan los sensores de voltaje y temperatura interna, el sensor de temperatura se ubicó un lugar cercano a la salida de aire del Aire acondicionado (AC), buscando que las mediciones del sistema de control sean similares a las tomadas por el AC como parte del funcionamiento de sus control interno.

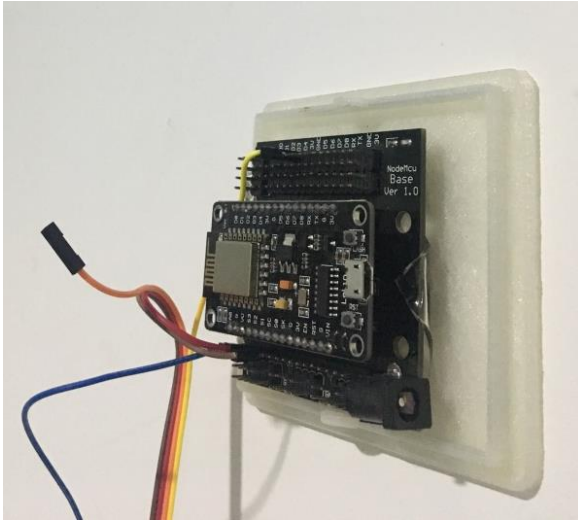


Figura 23. Montaje del Broker.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. montaje del sensor ECS1030 en equipo de refrigeración.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 25. Montaje de sensor de corriente, voltaje y temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26 se observa el LED IR, que apunta hacia el receptor que posee el AC. Con este elemento es posible modificar el set point del AC, según la salida de la técnica de control aplicada.

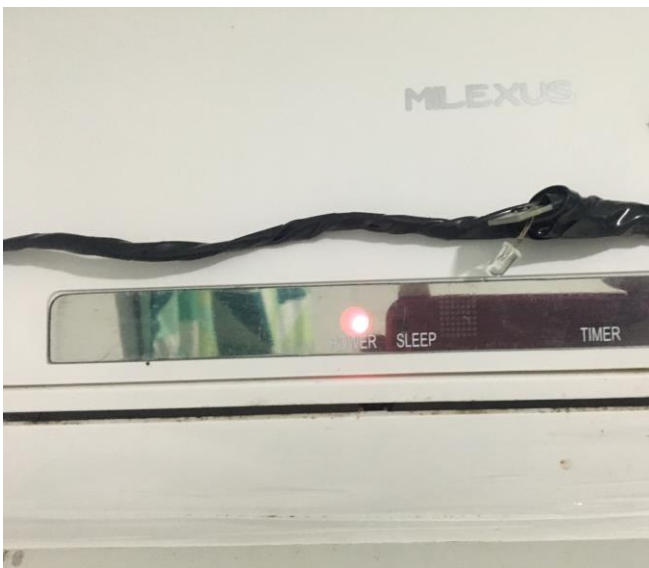


Figura 26. Montaje de actuador.

Fuente: Elaboración propia.

10.4. Validación del sistema

Para la validación del funcionamiento del sistema de control se visualizaron los datos almacenados en la plataforma a través de gráficas en internet. Lo anterior usando el portal dedicado a sistemas de IoT llamado Ubidots, que suministra una librería compatible con el protocolo MQTT.

Después de instalado el sistema de control, se validó que se transmiten a la plataforma los datos del AC intervenido, a través de la visualización en tiempo de real de las actualizaciones, fue implementado el sistema de control seleccionado en el numeral 10.2, el dispositivo funciona con éxito, permitiendo brindar datos que ayudan a realizar un uso racional de la energía logrando un grado de temperatura de confort para el recinto.

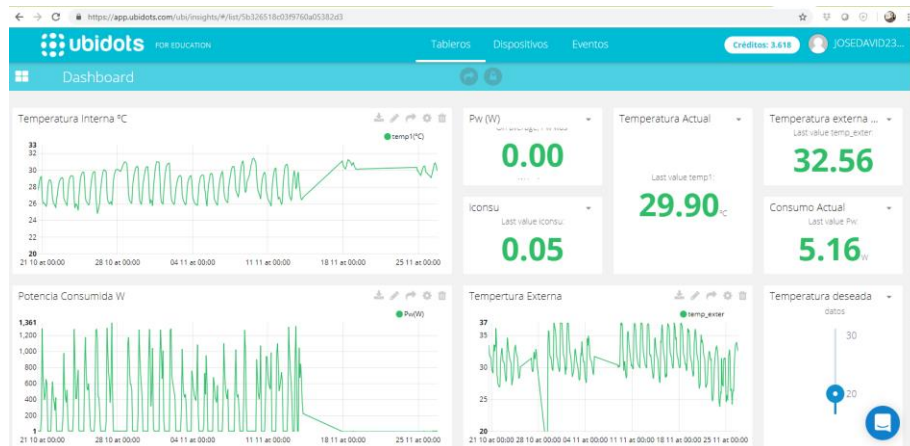


Figura 27. Visualización de las variables monitoreadas.

Fuente: Elaboración propia.

Análisis y Resultados.

En esta sección se describen los resultados obtenidos del análisis, el diseño e implementación de la solución planteada en la sección anterior.

11. Análisis de la literatura

En esta sección se describen los resultados obtenidos del análisis de literatura consultada, como aspecto importante se encontró que las variables eléctricas y ambientales más relevantes son: 1) Potencia consumida y 2) temperatura externa e interna. Además, como se refleja en la figura 28, de los 4 pilares consultados los autores enfatizan en las señales de control, los sistemas de control y el control remoto. Pero claramente existe poca investigación donde se relacione las técnicas de control con la temperatura externa e interna, sumado a esto los sistemas HVAC .

Sin embargo, (Wu, Jia, & Guan, 2016), asocia los sistemas de climatización a las técnicas de control clásicas, donde las variables de interés son la temperatura y la potencia consumida, así mismo, (Wang et al., 2013) evidenció que los factores de ineficiencias de los sistemas de climatización están asociados a la incorrecta instalación los sensores y secuencias de control incorrectas, identificando que la variable mínima para realizar un estudio en estos sistemas es la temperatura interna y externa de los recintos.



Figura 28. Resultados del análisis de la literatura.

Fuente elaboración propia.

Basados en la herramienta PatBase ver figura 29 se realizó una vigilancia tecnológica de los productos patentados asociados a los sistemas HVAC incluyendo dentro de las palabras claves de búsqueda: consumo energético, monitoreo y control, Internet de las cosas, las temperaturas internas y externas. Se identifica que la empresa Google es la compañía líder con aproximadamente 360 patentes solicitadas y 160 concebidas, seguido de Honeywell con aproximadamente 290 solicitadas y 110 obtenidas. Lo anterior revela la importancia de esta investigación, en tanto que se está aportando una experiencia investigativa a la literatura, e incentivando a nuevos productos susceptibles a protección.

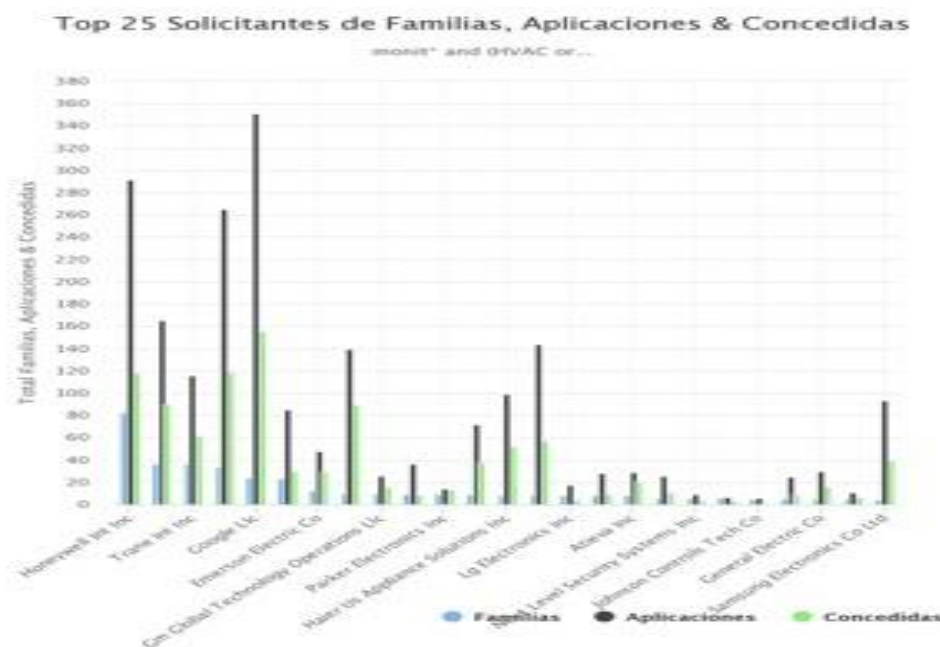


Figura 29. Resultados de la vigilancia tecnológica.

Fuente: elaboración propia.

12. Diseño del sistema de control de AC

Luego de la identificación de las variables de interés hacemos uso de la arquitectura presentada en la sección 10.2, se capturan los datos por medio de placa Arduino Mega conectada al puerto USB del computador, estas variables son tabuladas e ingresadas al IDE de Matlab, arrojando como resultado la gráfica que se ilustra en la figura 30, donde se registran los valores de la temperatura, consumo energético y tiempo, la gráfica de color azul representa la temperatura (eje y) con respecto al tiempo (eje x), así mismo, la gráfica de color rojo representa la potencia consumida (eje y) con respecto al tiempo (eje x).

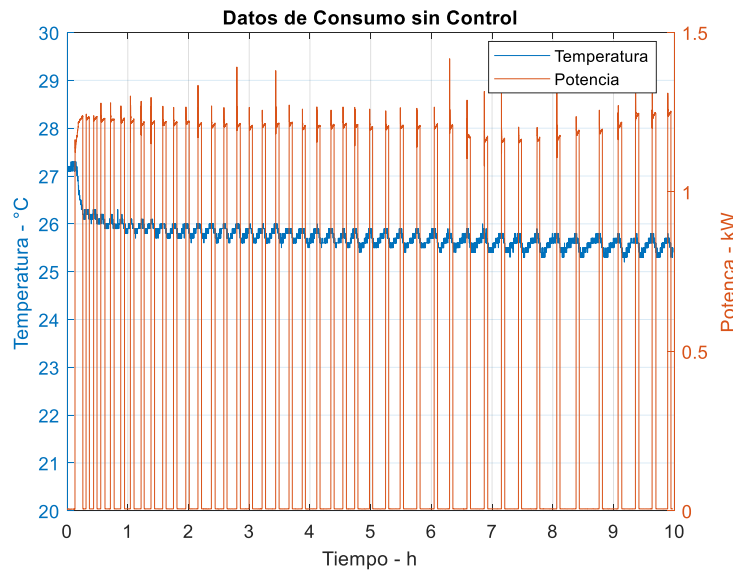


Figura 30. Gráfica de la temperatura y el consumo del equipo en estudio.

Fuente: elaboración propia.

Según los resultados registrados en figura 30, se evidencia que la técnica de control que utiliza el sistema de climatización es un técnica de control clásico llamada ON/OFF, así mismo, se observa que esta técnica de control posee una brecha diferencial o banda muerta de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, ocasionando que el sistema de control no logre llegar al set point suministrado por el usuario.

Además de las gráficas, se incluyó la temperatura externa a los datos y se analizaron con la herramienta SPSS, realizando un análisis de la correlación de variables de Pearson (Talca, 2009). La tabla 7.1 nos muestra una correlación de Pearson es de 1, lo que según Talca (2009), es una relación directa entre las dos variables en estudio, pero la influencia que tiene una de la otra es de 0,795, para nuestro caso la temperatura interna y la temperatura externa del recinto en estudio.

Tabla 7.

Correlaciones entre temperatura interna y temperatura externa.

Correlaciones		TEMP_INT	TEMP_EXT
TEMP_INT	Correlación de Pearson	1	,795**
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	7617,346	5640,157
	Covarianza	1,052	,779
	N	7242	7242
TEMP_EXT	Correlación de Pearson	,795**	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	5640,157	6611,043
	Covarianza	,779	,913
	N	7242	7242

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior muestra que existe una necesidad en mitigar la temperatura interna para poder obtener una temperatura deseada que esté dentro de los valores de confort.

13. Implementación del Sistema

En la figura 31 se evidencia la implementación del sistema en el equipo de climatización.



Figura 31. Montaje del sistema completo.

Fuente: elaboración propia.

Además, ingresando a la dirección <http://proyectoslocales.xyz/sistemu/admin-area.php>, la plataforma **HVACcontroler** nos solicitará un usuario y una contraseña, para efectos de este estudio el usuario es: admin y la contraseña: admin. Ver figura 32

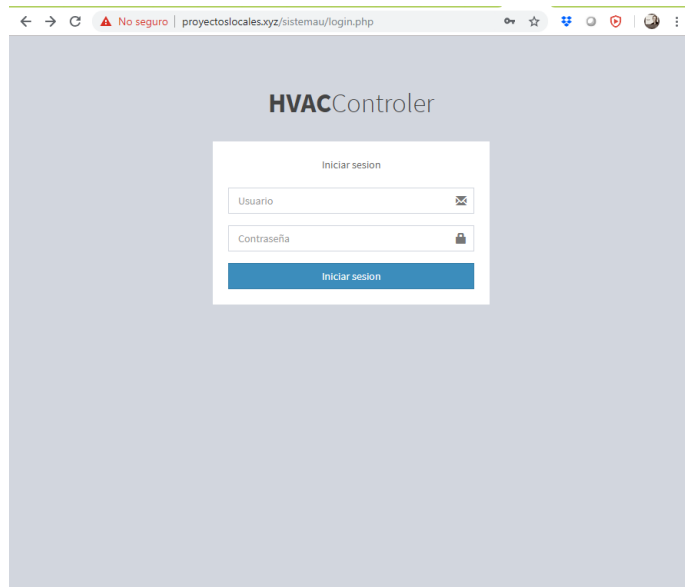


Figura 32. Visualización de la plataforma.

Fuente: Elaboración propia.

14. Validación del sistema

Luego de ingresar a la plataforma con las credenciales correspondientes encontraremos tres gráficas, temperatura interna, temperatura externa y potencia consumida, como se ilustra en la figura 33. Además del ultimo valor de potencia actual y promedio en las últimas 24 horas, la temperatura externa e interna, la corriente consumida, y el valor de temperatura deseada.

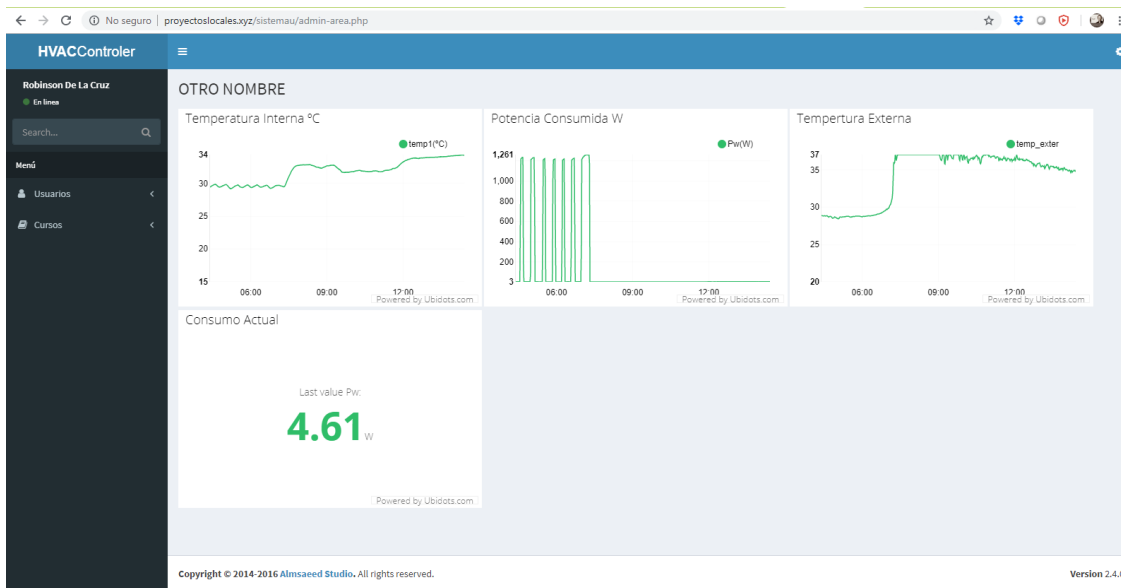


Figura 33. Tablero inicial de la plataforma HVACcontroler.

Fuente: Elaboración propia.

14.1. Monitoreo de temperatura interna

En la figura 34 se observa el comportamiento de la temperatura de un recinto en las últimas 12 horas, cabe aclarar que este valor se puede modificar para conveniencia del usuario, es decir, el sistema tiene la capacidad de almacenar hasta 3 meses de datos

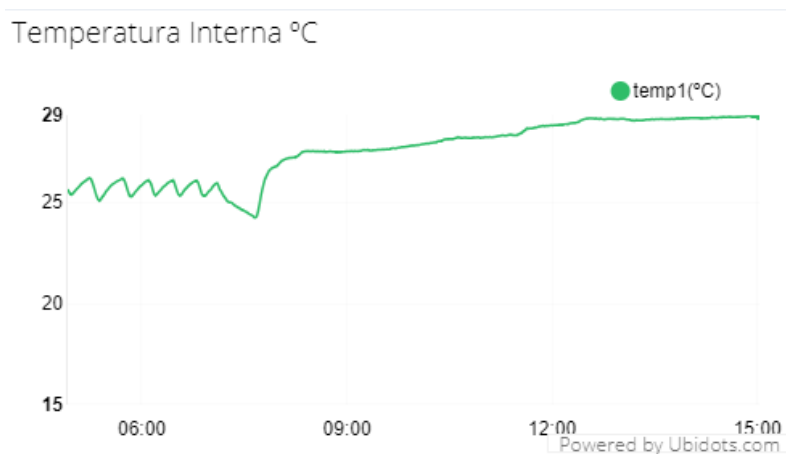


Figura 34. Grafica de monitoreo de temperatura interna.

Fuente: Elaboración propia.

El eje vertical de la figura 33 representa la temperatura registrada y el eje horizontal representa el tiempo en horas. Observando la figura 34 tiene un comportamiento similar a la figura .

14.2. Potencia consumida

En la figura 35 se observa el comportamiento de la potencia consumida en Vatios por el sistema de climatización de un recinto en las últimas 12 horas, donde el eje vertical representa la Potencia en KW y el eje horizontal el tiempo en Horas

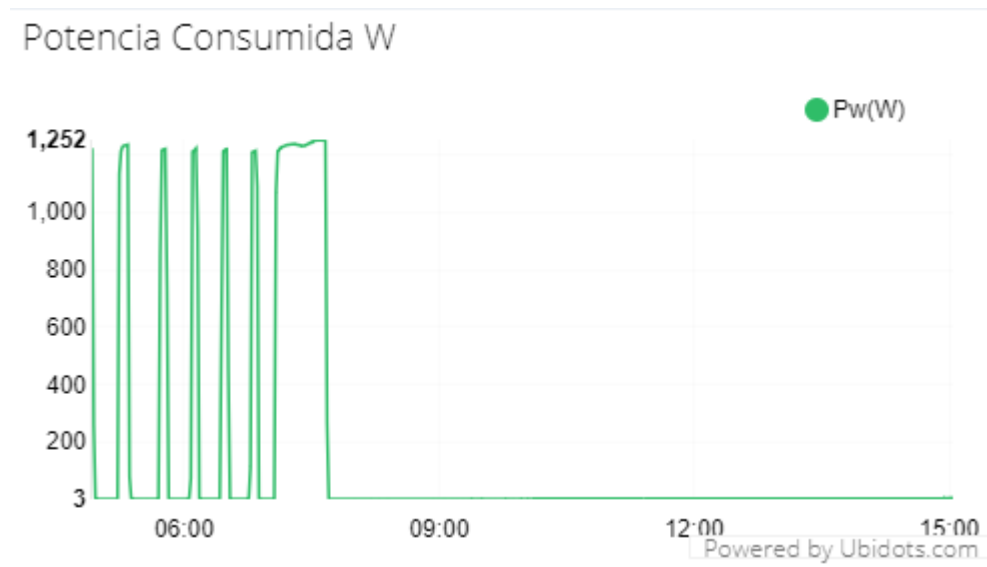


Figura 35. Monitoreo de la potencia consumida en KW.

Fuente: Elaboración propia.

14.3. indicadores de temperatura y consumo instantáneo

los indicadores de variables en la plataforma HVACcontroller, representan el dato instantáneo sensado por el sistema, ver figura 36

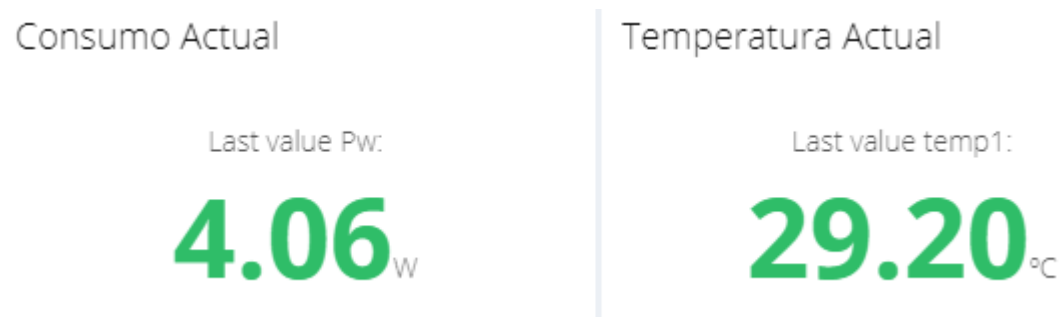


Figura 36. Indicadores de potencia y temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

14.4. Temperatura externa actual y potencia promedio de las últimas 24 horas

En la figura 37 se observa los valores de la temperatura externa, además, la temperatura externa promedio de las últimas 24 horas, así mismo estos indicadores son muy útil a la hora de querer interpretar el valor actual y promedio de nuestras variables

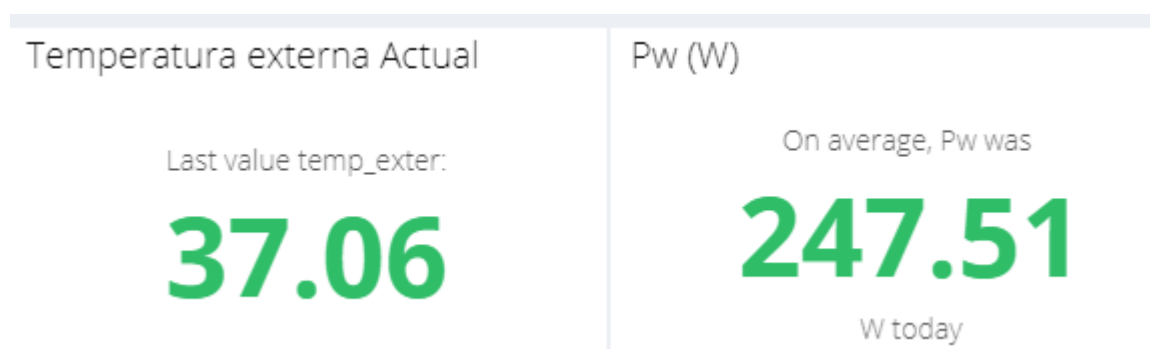


Figura 37. Temperatura externa actual y potencia promedio.

Fuente: elaboración propia.

14.5. Corriente instantánea

Otro indicador relevante es la corriente dado es que uno de los factores más importantes a la hora de calcular el consumo de un dispositivo, ver figura 38.

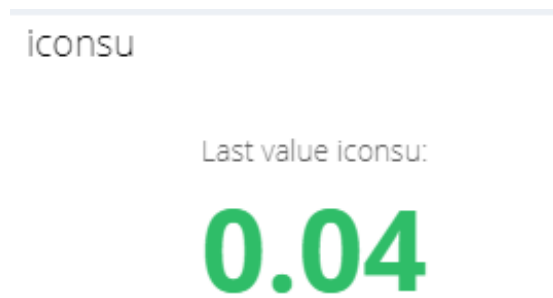


Figura 38. Temperatura externa actual y potencia promedio.

Fuente: elaboración propia.

14.6. Análisis de los resultados con la implementación del sistema

HVACControler

Luego de implementar la técnica de control seleccionada, se descargan los datos alojados en la base de datos y se hace uso del Ide de Matlab, graficamos la temperatura con respecto al tiempo y la potencia con respecto al tiempo como se ilustra en la figura 39, donde evidenciamos que la temperatura si alcanza el valor deseado por el usuario, recordando que para nuestro caso de estudio es de 25 °C,

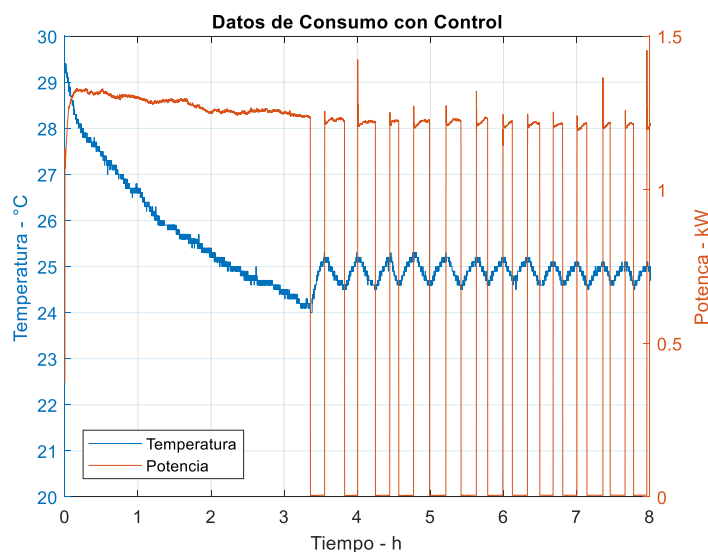


Figura 39. Grafica de variables implementando el sistema de control.

Fuente: elaboración propia.

14.6.1. Análisis de Correlación de Pearson

Luego de implementado el sistema observamos en la tabla 8 que la correlación de Pearson es de 0,37, en comparación con el valor de la sección 7.2 se evidencia que se redujo en un 46.5 %, lo que nos indica que se logró un mayor control sobre la variable y el recinto en estudio.

Tabla 8.

Correlación de Pearson Luego de implementado el Sistema.

Correlaciones		TEMP_INT	TEMP_EXT
TEMP_INT	Correlación de Pearson	1	,374
	Sig. (bilateral)		,000
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	6888,045	3317,731
	Covarianza	,951	,458
	N	7242	7242
TEMP_EXT	Correlación de Pearson	,374	1
	Sig. (bilateral)	,000	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	3317,731	11431,489
	Covarianza	,458	1,579
	N	7242	7242

Fuente: elaboración propia.

14.6.2. Análisis de la temperatura

Realizando una comparación de la figura 7.1 con la 7.10, observamos que el sistema en la primera grafica no alcanzo su set point, (para nuestro caso es 25° C), sin embargo cuando se implementó el sistema HVAC Controller el sistema alcanzó la temperatura deseada, lo anterior ocurre porque usa como control nativo la técnica ON/OFF, con una brecha diferencial de +/- 1°, que hace ineficiente al sistema cuando el usuario selecciona

una temperatura deseada que esté cerca de las establecida como temperaturas de confort. En la figura 40 observamos que la temperatura media sin el sistema es de 26.43 °C y la temperatura media con el sistema es de 25.9 °C, evidenciando una mejora en el funcionamiento del equipo y confort por parte del usuario.

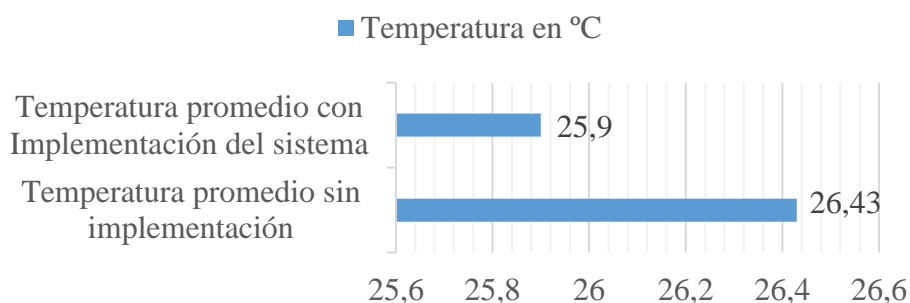


Figura 40. Comparación de temperatura interna.

Fuente: Elaboración propia.

Basándonos en las temperaturas registrada y la potencia consumida, podemos observar que el consumo antes de aplicar el sistema era de luego de llegar al set point 26 por brecha diferencial fue en el momento que se apagó la condensadora y nunca llegó a 25°C.

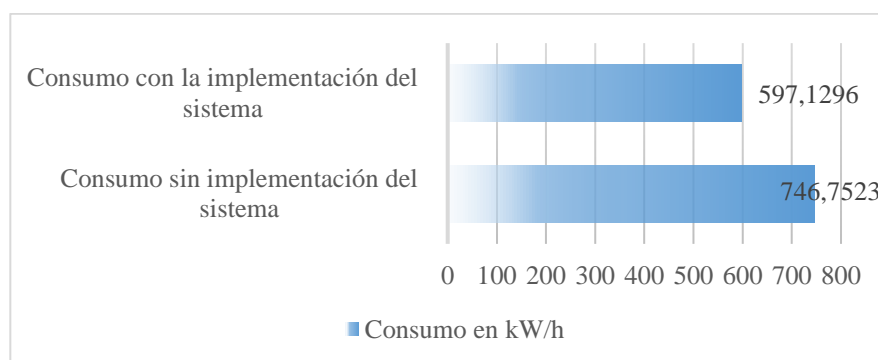


Figura 41. Comparación del consumo de potencia del sistema.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

En la búsqueda de satisfacer el objetivo general de este proyecto de investigación, se obtuvieron los siguientes hallazgos y conclusiones:

De la revisión del estado de la literatura se encontró que las variables mayormente considerada para estudios en eficiencia energética en equipos AC se dividen en dos grupos: las variables eléctricas y ambientales. La variable eléctrica más importante es la Potencia consumida y la variable ambiental mayormente considerada es la temperatura la temperatura interna (recinto). Sin embargo, se evidencian pocas investigaciones que consideran la Temperatura externa como una variable de importancia radical al aplicar técnicas de control.

A partir de la caracterización del equipo de aire acondicionado intervenido se observa que la técnica de control que éste utiliza internamente es la ON/OFF. Así mismo, se observa que esta técnica de control posee una brecha diferencial o banda muerta de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, ocasionando que el sistema de control no logre el set point requerido por el usuario.

En esta investigación se verificó que existe una relación directa entre la temperatura externa y el consumo de energía de un sistema AC, a través de un análisis de estadístico con el software SPSS, correlacionando la temperatura externa con las variables de temperatura interna y potencia consumida por el AC.

A partir de la integración de un sistema de control y monitoreo a las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT), es posible obtener un sistema que permite mejorar la eficiencia de un equipo AC y proporciona información en tiempo real sobre el comportamiento del equipo. Otra de las ventajas del uso de las tecnologías IoT es que se tiene a disposición herramientas de gestión que permiten obtener información relevante a partir de los datos recabados por el sistema de control y monitoreo.

La implementación del sistema de control y monitoreo propuesto en esta investigación que involucra la temperatura externa en un equipo de Aire Acondicionado (AC) permite mejorar en un 20% el consumo de energía del equipo. Así como también permite mejorar el confort al aumentar la capacidad del equipo para alcanzar el set point deseado por el usuario.

Referencias

- Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. (2014). Theory and applications of HVAC control systems - A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72, 343–355.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.016>
- Alavi, A. H., Jiao, P., Buttlar, W. G., & Lajnef, N. (2018). Internet of Things-enabled smart cities: State-of-the-art and future trends. *Measurement*, 129, 589–606.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.067>
- Alliance, Z. (2008). Zigbee Specification. *Zigbee Alliance Website*, 1–604.
https://doi.org/http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2011/kjb79_ajm232/pmeter/ZigBee%20Specification.pdf
- Amorim, H. S. do, Dias, M. A., & Soares, V. (2015). Sensores digitais de temperatura com tecnologia one-wire: Um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. <https://doi.org/10.1590/S1806-11173742009>
- Andrew Banks and Rahul Gupta. (2013). OASIS Committee Specification Draft 01 / Public Review Draft 01, (12 December).
- Aosong. (2018). CM2301 temperature and humidity sensor. Retrieved from <http://www.aosong.com/en/products-28.html>
- Apache. (2017). The Apache Software Foundation!
- Apachefriends. (2017). XAMPP Installers and Downloads for Apache Friends.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Burgos, Á. M., Argüello, J. A., Prause, J., & Cenóz, P. J. (2013). Fenología de los estados vegetativos de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) en base al tiempo térmico. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 45(1).

- Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Zamora-Musa, R., Acosta-Coll, M., Caicedo-Ortiz, J., & Sepúlveda-Ojeda, J. (2016). Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000400005>
- Christian, T. T., Daniel, T., & Anaclet, F. (2018). NodeMCU in Patient ' s Data Transfer to IoT Platform, (May), 1–10.
- Colina, A. L., Vives, A., Zennaro, M., Bagula, A., & Pietrosevoli, E. (2016). *Internet of Thingsv In 5 Days*.
- Dignani, J. P. (2012). Análisis del protocolo ZigBee. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/18349>
- Echun Electronic Co., L. (2018). Split Core Current Transformer ECS1030-L72. *Echun Electronic Co., Ltd.*, 3. Retrieved from <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Current/ECS1030-L72-SPEC.pdf>
- Eguílaz, M. M. (2017). Programando directamente un ESP8266 (p. 52).
- electronicapty. (2018a). Modulo Sensor Emisor infrarrojo KY-005 para Arduino. Retrieved from <http://www.electronicapty.com/modulo-sensor-emisor-infrarrojo-ky-005-para-arduino-detail?tmpl=component&format=pdf>
- electronicapty. (2018b). Modulo sensor receptor Infrarrojo KY-022 para Arduino. Retrieved from <http://www.electronicapty.com/>
- Evans, D. (2011). The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything.
- Evans, D., Figuerola, N., Fundación de la Innovación Bankinter, Isenstadt, S., Security, N. C., Proves, A., ... Robla, I. (2011). Internet de las cosas: Cómo la próxima evolución de

Internet lo cambia todo. *Journal of Food Engineering*, 49(Emim), 314–318.

<https://doi.org/10.2991/emim-15.2015.61>

Eyras, P. (2012). CLIMATIZACION NATURAL DE AMBIENTES DENTRO DE LAS CABAÑAS DE LA “ COSTA.

Ibiblio. (2016). Capítulo 2. La Arquitectura LAMP.

International Energy Agency. (2016). Indicadores de Eficiencia Energética: Fundamentos Estadísticos (pp. 1–211). Retrieved from www.iea.org/books%0Ahttps://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IndicadoresdeEficienciaEnergética_FundamentosEstadísticos.pdf

Lin, B. Y. P. I., & Broberg, H. L. (2001). Remote control of HVAC APPLICATIONS allows for BETTER CONTROL and ENERGY UTILIZATION, 49–54.

Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*, 3(3), 164–173.
<https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>

Mercado de Energía y Tarifas. (2014).

Moreno, J. M., & Fernández, D. R. (2007). Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4).

MySQL. (2016). MySQL.

Naturaleza, P. O. R. (1993). Todos los hombres desean, por naturaleza, saber omnes homines natura scire desiderant. *UNIVERSITAS PHILOSOPHICA*, 3. Retrieved from <http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/vniphilosophica/article/view/11739/9624>

OBS. (2018). Lo que no se mide, no se gestiona. *OBS Business School*, 1–2. Retrieved from <https://www.obs-edu.com/int/blog-investigacion/logistica/lo-que-no-se-mide-no-se-gestiona>

- Pacheco, J., Rubio, J. D. J., Hernandez, J. A., Medina, A., Lopez, A., & Zacarias, A. (2018). Modeling of a HVAC system for clean rooms. *IEEE Latin America Transactions*, 16(3), 829–838. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8358663>
- PHP-Group. (2016). PHP: Hypertext Preprocessor.
- Rajith, A., Soki, S., & Hiroshi, M. (2018). Real-time optimized HVAC control system on top of an IoT framework. *2018 3rd International Conference on Fog and Mobile Edge Computing, FMEC 2018*, 181–186. <https://doi.org/10.1109/FMEC.2018.8364062>
- Robert McDowall. (2006). *Fundamentals of HVAC Systems* (Vol. 53).
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Education.
- SENSIRION. (2003). SHT1x / SHT7x SHT1x / SHT7x Product Summary.
- Talca, U. de. (2009). Manual Básico SPSS, 70.
- UPME. (2010a). Informe Sectorial Sobre La Evolución De La Distribución Y Comercialización De Energía Eléctrica En Colombia. *Sector Eléctrico Nacional*, 20–41. Retrieved from <http://www.siel.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=L9AASwJjMz8=&tabid=58>
- UPME. (2010b). Informe Sectorial Sobre La Evolución De La Distribución Y Comercialización De Energía Eléctrica En Colombia. *Sector Eléctrico Nacional*.
- Villadiego, K., & Velay-Dabat, M. A. (2014). Outdoor thermal comfort in a hot and humid climate of Colombia: A field study in Barranquilla. *Building and Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.017>
- Wang, L., Greenberg, S., Fiegel, J., Rubalcava, A., Earni, S., Pang, X., ... Hernandez-Maldonado, J. (2013). Monitoring-based HVAC commissioning of an existing office building for energy efficiency. *Applied Energy*, 102, 1382–1390. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.005>

- Weather Spark. (2018). El clima promedio en Barranquilla. Retrieved from <https://es.weatherspark.com/y/23451/Clima-promedio-en-Barranquilla-Colombia-durante-todo-el-año>
- Wu, Z., Jia, Q. S., & Guan, X. (2016). Optimal Control of Multiroom HVAC System: An Event-Based Approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(2), 662–669. <https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2446955>
- Yang, R., & Wang, L. (2015). Control strategy optimization for energy efficiency and comfort management in HVAC systems. *2015 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2015*. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2015.7131863>
- Yuan, M. (2018). Conociendo MQTT. *IBM*, 1–9.
- Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. (2014). Theory and applications of HVAC control systems - A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72, 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.016>
- Alavi, A. H., Jiao, P., Buttlar, W. G., & Lajnef, N. (2018). Internet of Things-enabled smart cities: State-of-the-art and future trends. *Measurement*, 129, 589–606. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.067>
- Alliance, Z. (2008). Zigbee Specification. *Zigbee Alliance Website*, 1–604. https://doi.org/http://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2011/kjb79_ajm232/pmeter/ZigBee%20Specification.pdf
- Amorim, H. S. do, Dias, M. A., & Soares, V. (2015). Sensores digitais de temperatura com tecnologia one-wire: Um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. <https://doi.org/10.1590/S1806-11173742009>

- Andrew Banks and Rahul Gupta. (2013). OASIS Committee Specification Draft 01 / Public Review Draft 01, (12 December).
- Aosong. (2018). CM2301 temperature and humidity sensor. Retrieved from <http://www.aosong.com/en/products-28.html>
- Apache. (2017). The Apache Software Foundation!
- Apachefriends. (2017). XAMPP Installers and Downloads for Apache Friends.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Burgos, Á. M., Argüello, J. A., Prause, J., & Cenóz, P. J. (2013). Fenología de los estados vegetativos de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) en base al tiempo térmico. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 45(1).
- Cama-Pinto, A., Piñeres-Espitia, G., Zamora-Musa, R., Acosta-Coll, M., Caicedo-Ortiz, J., & Sepúlveda-Ojeda, J. (2016). Diseño de una red de sensores inalámbricos para la monitorización de inundaciones repentinas en la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000400005>
- Christian, T. T., Daniel, T., & Anaclet, F. (2018). NodeMCU in Patient ' s Data Transfer to IoT Platform, (May), 1–10.
- Colina, A. L., Vives, A., Zennaro, M., Bagula, A., & Pietrosemoli, E. (2016). *Internet of Thingsv In 5 Days*.
- Dignani, J. P. (2012). Análisis del protocolo ZigBee. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/18349>

- Echun Electronic Co., L. (2018). Split Core Current Transformer ECS1030-L72. *Echun Electronic Co., Ltd.*, 3. Retrieved from <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Current/ECS1030-L72-SPEC.pdf>
- Eguílaz, M. M. (2017). Programando directamente un ESP8266 (p. 52).
- electronicapty. (2018a). Modulo Sensor Emisor infrarrojo KY-005 para Arduino. Retrieved from <http://www.electronicapty.com/modulo-sensor-emisor-infrarrojo-ky-005-para-arduino-detail?tmpl=component&format=pdf>
- electronicapty. (2018b). Modulo sensor receptor Infrarrojo KY-022 para Arduino. Retrieved from <http://www.electronicapty.com/>
- Evans, D. (2011). The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything.
- Evans, D., Figuerola, N., Fundación de la Innovación Bankinter, Isenstadt, S., Security, N. C., Proves, A., ... Robla, I. (2011). Internet de las cosas: Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo. *Journal of Food Engineering*, 49(Emim), 314–318. <https://doi.org/10.2991/emim-15.2015.61>
- Eyras, P. (2012). CLIMATIZACION NATURAL DE AMBIENTES DENTRO DE LAS CABAÑAS DE LA “ COSTA.
- Ibiblio. (2016). Capítulo 2. La Arquitectura LAMP.
- International Energy Agency. (2016). Indicadores de Eficiencia Energética: Fundamentos Estadísticos (pp. 1–211). Retrieved from www.iea.org/books%0Ahttps://www.iea.org/publications/freepublications/publication/IndicadoresdeEficienciaEnergética_FundamentosEstadísticos.pdf
- Lin, B. Y. P. I., & Broberg, H. L. (2001). Remote control of HVAC APPLICATIONS allows for BETTER CONTROL and ENERGY UTILIZATION, 49–54.

- Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*, 3(3), 164–173.
<https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
- Mercado de Energía y Tarifas. (2014).
- Moreno, J. M., & Fernández, D. R. (2007). Informe Técnico: Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4).
- MySQL. (2016). MySQL.
- Naturaleza, P. O. R. (1993). Todos los hombres desean, por naturaleza, saber omnes homines natura scire desiderant. *UNIVERSITAS PHILOSOPHICA*, 3. Retrieved from
<http://revistas.javeriana.edu.co/index.php/vniphilosophica/article/view/11739/9624>
- OBS. (2018). Lo que no se mide, no se gestiona. *OBS Business School*, 1–2. Retrieved from
<https://www.obs-edu.com/int/blog-investigacion/logistica/lo-que-no-se-mide-no-se-gestiona>
- Pacheco, J., Rubio, J. D. J., Hernandez, J. A., Medina, A., Lopez, A., & Zacarias, A. (2018). Modeling of a HVAC system for clean rooms. *IEEE Latin America Transactions*, 16(3), 829–838. <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8358663>
- PHP-Group. (2016). PHP: Hypertext Preprocessor.
- Rajith, A., Soki, S., & Hiroshi, M. (2018). Real-time optimized HVAC control system on top of an IoT framework. *2018 3rd International Conference on Fog and Mobile Edge Computing, FMEC 2018*, 181–186. <https://doi.org/10.1109/FMEC.2018.8364062>
- Robert McDowall. (2006). *Fundamentals of HVAC Systems* (Vol. 53).
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., & Lucio, P. B. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Education.
- SENSIRION. (2003). SHT1x / SHT7x SHT1x / SHT7x Product Summary.
- Talca, U. de. (2009). Manual Básico SPSS, 70.

- UPME. (2010a). Informe Sectorial Sobre La Evolución De La Distribución Y Comercialización De Energía Eléctrica En Colombia. *Sector Eléctrico Nacional*, 20–41. Retrieved from <http://www.siel.gov.co/LinkClick.aspx?fileticket=L9AASwJjMz8=&tabid=58>
- UPME. (2010b). Informe Sectorial Sobre La Evolución De La Distribución Y Comercialización De Energía Eléctrica En Colombia. *Sector Eléctrico Nacional*.
- Villadiego, K., & Velay-Dabat, M. A. (2014). Outdoor thermal comfort in a hot and humid climate of Colombia: A field study in Barranquilla. *Building and Environment*.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.017>
- Wang, L., Greenberg, S., Fiegel, J., Rubalcava, A., Earni, S., Pang, X., ... Hernandez-Maldonado, J. (2013). Monitoring-based HVAC commissioning of an existing office building for energy efficiency. *Applied Energy*, 102, 1382–1390.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.005>
- Weather Spark. (2018). El clima promedio en Barranquilla. Retrieved from <https://es.weatherspark.com/y/23451/Clima-promedio-en-Barranquilla-Colombia-durante-todo-el-año>
- Wu, Z., Jia, Q. S., & Guan, X. (2016). Optimal Control of Multiroom HVAC System: An Event-Based Approach. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 24(2), 662–669.
<https://doi.org/10.1109/TCST.2015.2446955>
- Yang, R., & Wang, L. (2015). Control strategy optimization for energy efficiency and comfort management in HVAC systems. *2015 IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, ISGT 2015*. <https://doi.org/10.1109/ISGT.2015.7131863>
- Yuan, M. (2018). Conociendo MQTT. *IBM*, 1–9.